



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

OPTIMALIZACE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ ZA POMOCI TVAROVÉHO SPOTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Martin FARKAŠ

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 - Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN - Bez specializace

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Farkaš** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **492715**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace laserového svařování za pomoci tvarového spotu

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of laser welding by shape spot

Pokyny pro vypracování:

- Rešerše problematiky laserového svařování korozivzdorných ocelí
- Popis svařitelnosti korozivzdorných austenitických ocelí
- Návrh experimentu – výroba svařovaných kruhových trubek ve firmě Atll a spol. s r.o. Továrna na stroje – nastavení parametrů za účelem dosažení maximální kvality svaru při dosažení vysoké rychlosti a nízkého výkonu laseru.
- Vyhodnocení vytvořených vzorků svarových spojů – z hlediska výskytu vad, ovlivnění struktury a mechanických vlastností
- Závěrečné zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČÍHAL, V. Korozivzdorné oceli a slitiny. 1. vyd. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200- 0671-0.
- [2] KATAYAMA, S. Fundamentals and Detail of Laser Welding. Springer Verlag, Singapore, 2021. ISBN: 9811579350
- [3] LANDERS, J. Laser Engineering. Willford Press. 2016. ISBN: 1682850811

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava KOLAŘÍKA, Ph.D., IWE a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Úvod této práce bych rád věnoval poděkování vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za vedení práce, přínosné připomínky i poskytnuté konzultace, a to jak v části teoretické, tak části praktické. Dále děkuji doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za vedení a spolupráci při přípravě laboratorních vzorků a jejich následném ohledání.

Anotace

| | |
|-------------------------------|--|
| Název diplomové práce: | Optimalizace laserového svařování za pomoci tvarového spotu |
| Autor práce: | Bc. Martin Farkaš |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Akademický rok: | 2023 / 2024 |
| Vysoká škola: | ČVUT v Praze, Fakulta strojní |
| Ústav: | 12133 – Ústav strojírenské technologie |
| Vedoucí ústavu: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Rozsah práce: | 92 stránek, 9 tabulek, 59 obrázků |
| Klíčová slova: | Laserové svařování, optimalizace svařování, kontinuální svařování, vady svarů, korozivzdorná ocel |
| Anotace: | Práce je věnována optimalizaci LBW za pomoci tvarového spotu v kombinaci s ARM módem. Teoretická část se zabývá základy svařování s důrazem na LBW včetně představení nejčastěji se vyskytujících vad svarových spojů a metod jejich testování. V experimentální části je proveden svařovací experiment kruhovým i tvarovým (eliptickým) spotem, který je následně laboratorně vyhodnocen. |

Annotation

| | |
|-----------------------------------|---|
| Title of the final thesis: | Optimization of laser welding by shape spot |
| Author: | Bc. Martin Farkaš |
| Supervisor: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Academic year: | 2023 / 2024 |
| University: | CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering |
| Department: | 12133 – Department of Manufacturing Technology |
| Head of department: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Extent: | 92 pages, 9 tables, 59 pictures |
| Keywords: | Laser welding, welding optimalization, continuous welding, weld defects, stainless steel |
| Annotation: | The work is devoted to the optimization of LBW with the help of shape spot in combination with ARM mode. The theoretical part deals with the basics of welding with an emphasis on LBW, including the introduction of the most frequently occurring weld joint defects and their testing methods. In the experimental part, a welding experiment with circular and shaped (elliptical) spots is performed, which is subsequently evaluated in the laboratory. |

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. ÚVOD..... | 14 |
| 2. CÍLE PRÁCE..... | 15 |
| 3. ZÁKLADNÍ PRINCIPY SVAŘOVÁNÍ | 16 |
| 3.1. Obecný popis svařování..... | 16 |
| 3.2. Svařitelnost korozivzdorných ocelí..... | 17 |
| 3.3. Svařování elektrickým obloukem | 21 |
| 3.4. Svařování elektronovým svazkem (512 dle ČSN EN ISO 4063) | 22 |
| 3.5. Ultrazvukové svařování (41) | 23 |
| 3.6. Laserové svařování (52)..... | 25 |
| 4. ZÁKLADNÍ POJMY PRO LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ | 26 |
| 4.1. Laserový paprsek | 26 |
| 4.1.1. Kvalita laserového paprsku..... | 29 |
| 4.1.2. Vlnová délka laserového paprsku..... | 29 |
| 5. POPIS KONSTRUKCE | 30 |
| 5.1. Laserový zdroj..... | 30 |
| 5.1.1. Účinnost..... | 31 |
| 5.2. Optické vlákno | 32 |
| 5.3. Procesní hlava..... | 33 |
| 6. TYPY LASERŮ | 34 |
| 6.1. Charakteristiky pro kategorizaci laserů | 34 |
| 6.2. Plynové lasery..... | 35 |
| 6.2.1. Aktivní prostředí | 35 |
| 6.2.2. Buzení | 35 |
| 6.2.3. CO ₂ lasery..... | 35 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.3. | Pevnolátkové lasery..... | 36 |
| 6.3.1. | Aktivní prostředí | 36 |
| 6.3.2. | Buzení | 37 |
| 6.3.3. | Vláknový laser..... | 37 |
| 6.3.4. | YAG lasery..... | 38 |
| 6.3.5. | Diodové lasery | 39 |
| 6.3.6. | Diskové lasery | 39 |
| 6.4. | Srovnání laserového svařování s ostatními technologiemi..... | 40 |
| 7. | DRUHY SVARŮ | 41 |
| 7.1. | Bodové svary | 41 |
| 7.2. | Kontinuální svary | 42 |
| 7.3. | Kondukční svary..... | 42 |
| 7.4. | Keyhole svary..... | 43 |
| 8. | VADY SVARŮ..... | 43 |
| 8.1. | Trhliny – skupina č. 1 | 44 |
| 8.1.1. | Horké trhliny (Ea)..... | 44 |
| 8.1.2. | Studené trhliny (Ef)..... | 44 |
| 8.1.3. | Podélná trhlina (EN ISO 6520 – vada č. 101)..... | 45 |
| 8.1.4. | Příčná trhlina (102) | 45 |
| 8.1.5. | Kráterová trhlina (104) | 45 |
| 8.2. | Dutiny – skupina č. 2..... | 45 |
| 8.2.1. | Pór (2011) | 45 |
| 8.2.2. | Staženina (202) | 46 |
| 8.3. | Studené spoje a neprůvary – skupina č. 4..... | 46 |
| 8.3.1. | Studený spoj (401)..... | 46 |
| 8.3.2. | Neprůvar (402) | 46 |

| | | |
|--------|---|----|
| 8.4. | Vady tvaru a rozměru – skupina č. 5 | 47 |
| 8.4.1. | Zápal (501) | 47 |
| 8.4.2. | Nadměrný průvar (504) | 47 |
| 8.4.3. | Lineární přesazení (507) | 47 |
| 8.4.4. | Proláklina (509)..... | 48 |
| 8.4.5. | Neúplné vyplnění svaru (511)..... | 48 |
| 8.5. | Různé vady – skupina č.6..... | 48 |
| 8.5.1. | Rozstřík (602)..... | 48 |
| 8.5.2. | Náběhové zbarvení (610) | 48 |
| 8.5.3. | Okujený povrch (613) | 49 |
| 8.6. | Mezikrystalická koroze | 49 |
| 9. | TESTOVÁNÍ SVARŮ | 50 |
| 9.1. | Nedestruktivní testování | 50 |
| 9.1.1. | Vizuální kontrola..... | 50 |
| 9.1.2. | Kapilární zkouška | 51 |
| 9.1.3. | Magnetická prášková kontrola | 52 |
| 9.1.4. | Ultrazvuková kontrola | 52 |
| 9.1.5. | Zkouška prozářením | 53 |
| 9.1.6. | Testování vířivými proudy | 53 |
| 9.2. | Destruktivní testování | 54 |
| 9.2.1. | Metalografická zkouška | 54 |
| 9.2.2. | Zkouška tahem..... | 55 |
| 9.2.3. | Zkouška tvrdosti | 56 |
| 9.2.4. | Zkouška rázem v ohybu | 56 |
| 9.2.5. | Zkouška ohybem..... | 58 |

| | |
|--|----|
| 10. MODIFIKACE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ..... | 58 |
| 10.1. Svařování koaxiálním spotem – metoda ARM | 58 |
| 10.1.1. Paprsky stejné vlnové délky | 58 |
| 10.1.2. Paprsky odlišné vlnové délky..... | 59 |
| 10.2. Svařování tvarovým spotem | 59 |
| 11. ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE..... | 61 |
| 12. EXPERIMENT..... | 62 |
| 12.1. Výrobní zařízení | 62 |
| 12.2. Svařovací komponenty | 63 |
| 13. POSTUP EXPERIMENTU | 64 |
| 13.1. Postup přípravy vzorků – Kruhový ARM mód | 65 |
| 13.2. Postup přípravy vzorků – Eliptický ARM spot..... | 66 |
| 13.3. Postup přípravy metalografických vzorků | 67 |
| 13.4. Postup přípravy vzorků k měření mikrotvrdosti..... | 67 |
| 13.5. Postup přípravy vzorků k měření tažnosti..... | 68 |
| 13.6. Postup vyhodnocení metalografických vzorků..... | 68 |
| 13.7. Postup vyhodnocení mikrotvrdosti | 69 |
| 13.8. Postup vyhodnocení tažnosti | 70 |
| 14. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | 70 |
| 14.1. Vyhodnocení vizuální kontroly svarového spoje..... | 70 |
| 14.2. Vyhodnocení metalografických výbrusů svaru..... | 71 |
| 14.3. Vyhodnocení mikrostruktury svarového spoje | 74 |
| 14.4. Vyhodnocení mikro tvrdosti | 77 |
| 14.5. Vyhodnocení tahové zkoušky | 78 |
| 15. ZÁVĚR | 80 |
| BIBLIOGRAFIE..... | 81 |

| | |
|----------------------|----|
| SEZNAM TABULEK..... | 90 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 91 |

Seznam zkratek

| Zkratka | Význam | Vysvětlení |
|------------------|--------------------------|---|
| cca | Circa | Přibližně |
| TOO | Tepelně ovlivněná oblast | Tepelně ovlivněná oblast |
| ARM | Adjustable ring mode | Režim přerozdělitelného výkonu v rámci koaxiálního spotu |
| BPP | Beam Parameter Product | Parametr paprsku (kvalita laser. paprsku) |
| CW laser | Continuous Wave Laser | Laser s kontinuálním průběhem výkonu |
| PW laser | Pulsed Wave Laser | Laser s pulzním průběhem výkonu |
| EBM | Electron Beam Welding | Svařování elektronovým paprskem |
| LBW | Laser Beam Welding | Svařování laserovým paprskem |
| HF laser | High Frequency Laser | Vysokofrekvenční svařování |
| Er | Erbium | Erbium |
| Ni | Nickel | Nikl |
| Mn | Manganese | Mangan |
| Mo | Molybdenum | Molybden |
| Nd | Neodymium | Neodym |
| Ti | Titanium | Titan |
| W | Wolfram | Wolfram |
| Yb | Ytterbium | Ytterbium |
| SiO ₂ | Silicon Dioxide | Oxid křemičitý |

| | | |
|------------------|------------------------------|---------------------------|
| NDT | Nondesctrutive testing | Nedestruktivní testování |
| ET | Eddy Current testing | Testování vířivými proudy |
| AC | Alternating current | Střídavý proud |
| DC | Direct current | Stejnoseměrný proud |
| RF | Radio frequency | Rádio frekvenční |
| YAG | Yttrium Aluminium Garnet | Yttrito hlinitý granát |
| YFL | Yttrium Lithium Fluoride | Fluorid lithno yttritý |
| YAP | Yttrium Aluminium Perovskite | Perovskit hlinitý-yttritý |
| YVO ₄ | Yttrium Vanadate | Vanadičnan yttritý |

Seznam použité symboliky

| Symbol | Vysvětlení |
|---------------|------------|
| nm | Nanometr |
| μm | Mikrometr |
| mm | Milimetr |
| W | Watt |
| kW | Kilowatt |
| l | Litr |
| s | Sekunda |
| min | Minuta |
| kg | Kilogram |
| kgf | Kilopond |

1. ÚVOD

Diplomová práce je věnována problematice laserového svařování (LBW – Laser Beam Welding), které postupně nalézá své uplatnění ve stále více aplikacích. Jedná se o pokročilou technologii výroby svarových spojů za pomoci laserového paprsku, který přináší schopnost minimalizace velikosti svarů i jejich tepelně ovlivněné oblasti (TOO), které negativně ovlivňují mechanické, chemické a mnohdy i vizuální charakteristiky a vlastnosti. Výhody metody LBW jsou však vyvažovány výrazně vyššími pořizovacími náklady a potřebnou stabilitou procesních podmínek. Díky výhodám laserového svařování začíná tato technologie vytlačovat např. dodnes hojně využívané vysokofrekvenční svařování (HF svařování). Velkým podílem výrobního portfolia jsou podélně svařované trubky pro tlakové účely, jejichž technická specifikace je přísně svázána požadavky normy taktéž určujícími povolené výrobní technologie.

Svařování ve všech svých podobách zaujímá zásadní roli v široké škále aplikací od nejjednodušších zařízení, po high-tech výrobky. S ohledem na kladené požadavky a výrobní množství dochází k volbě konkrétní technologie od konvenčních metod (dnes nejvíce používaných metod svařování el. obloukem v ochranných atmosférách - metody: MIG, MAG, TIG) až po svařování laserovým paprskem, elektronovým svazkem či ultrazvukové svařování.

Diplomová práce vznikla ve spolupráci s průmyslovým partnerem z oblasti návrhu a výroby válcovacích linek se zaměřením na výrobu tenkostěnných svařovaných profilů. Cílem spolupráce, a taktéž této práce, je analýza přínosu použití tvarového spotu při svařování korozivzdorné oceli EN 1.4512 (X2CrTi12) o tloušťce 0,6 mm za rychlosti $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je analýza laserového svařovacího procesu korozivzdorné ocelové pásky z materiálu EN 1.4512 o tloušťce 0,6 mm. Cílová rychlost svařování je $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, v případě pozitivních výsledků i vyšší. Předmětem optimalizace je ověření předpokládaného přínosu nahrazení koaxiálního spotu (ARM) spotem tvarovým, a to včetně stanovení vhodných procesních parametrů, mezi které řadíme zejména svařovací výkon, vzájemnou pozici ohniska a svaru, rozměr spotu a průtok ochranné atmosféry.

Výsledný návrh procesních parametrů bude ověřen na laboratorně vyhodnocených vzorcích. Na základě získaných výsledků bude doporučena vhodná technická specifikace laserového zařízení pro implementaci do válcovací linky kruhových profilů o průměru 15 až 30 mm. Vyhodnocení vad svarových spojů bude provedeno v souladu s planými normami.

3. ZÁKLADNÍ PRINCIPY SVAŘOVÁNÍ

3.1. Obecný popis svařování

Svařování je technologie, při které dochází k výrobě nerozbitelného spoje dvou nebo více dílů. Prvopočátky svařování sahají až do tzv. kovářského svařování, kdy docházelo ke spojení dílů za působení tepla a tlaku. Kovářské svařování bylo po dobu několika století jedinou známou technologií svařování, a to až do doby 2. průmyslové revoluce. Začátkem 19. století dochází k objevu elektrického oblouku a koncem 19. století dochází k rozvoji využití elektrického oblouku pro účely svařování, dále se rozvíjely ve stejné době i další dvě základní metody svařování: odporové svařování a svařování kyslíko-acetylenovým plamenem. Uvedené metody postupně vytlačily dříve hojně využívané nýtování používané např. u parních kotlů, mostních konstrukcí apod. Dalším impulsem rozvoje technologie svařování byla první světová válka a s ní související rozsáhlá zbrojní výroba. Ve 30. letech 20. století začíná dominovat svařování elektrickým obloukem, jehož rozvoj intenzivně pokračuje i v období 2. světové války. Dochází již i k vývoji svařování a výzkumu svařitelnosti hůře svařitelných materiálů. Ve 30. letech je vyvinuto také svařování pod tavidlem. V roce 1948 dochází k představení technologie MIG. V 50. letech dochází k vývoji metody TIG vhodné pro svařování hliníku a jeho slitin, jež nalézá významné uplatnění v oblasti letectví. [1]

Začátek rozvoje laserového svařování datujeme do 60. let, tedy nedlouho po vynálezu samotného laseru, představeného v roce 1960. Ve srovnání s dosavadními technologiemi svařování dochází k využití nového principu zpracování materiálů. Laserové svařování využívá fokusovaný laserový paprsek vysoké intenzity, jehož kinetická energie je při dopadu na svařenec absorbována a přeměněna na tepelnou energii tavní základní materiál. Vysoká intenzita paprsku umožňuje hluboké provaření, vysoké svařovací rychlosti a minimalizaci TOO. [2; 3]

Moderní metody svařování umožňují svařování vodivých i nevodivých materiálů, tedy i materiálů které jsou nekovové. S ohledem na svařovaný materiál a jeho (ne)vodivost el. proudu je volena vhodná technologie. Metody svařování elektrickým obloukem a elektrickým odporem umožňují svařování pouze elektricky vodivých materiálů. Svařování elektricky nevodivých materiálů je možné např. metodami třecího svařování či právě laserového svařování.

Vhodně provedené svarové spoje dokážou přenášet vysoké namáhání, při některých testech vykazují svary dokonce vyšší pevnosti než základní materiál. Svarové spoje jsou ovlivňovány celou řadou parametrů. Moderní výzvy technologie jsou: svařování odlišných materiálů (výroba tzv. heterogenních spojů), minimalizace vad svarů (zvyšování kvality svarů) a maximalizace výrobní produktivity. Svařování je lukrativní široce rozšířená technologie s vysokým budoucím potenciálem.

3.2. Svařitelnost korozivzdorných ocelí

Svařitelnost je obecně definována normou ČSN 05 1309:1990 (*Svařitelnost kovů a její hodnocení*) jako „komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svaru s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje.“[4]

Svařitelnost je důležitá technologická vlastnost materiálů označující schopnost vytvořit kvalitní svarový spoj. Svařitelností obvykle rozumíme metalurgickou charakteristiku určenou chemickým složením a mikrostrukturou materiálu. Pojem svařitelnost zahrnuje ale také možné technologie svařování a zohlednění vhodnosti konstrukčního řešení pro provedení svaru. Materiály dělíme na zaručeně svařitelné, svařitelné za určitých podmínek (např. předehřev) a obtížně svařitelné (příp. nesvařitelné). [5]

Svařitelnost oceli je dána zejména jejím chemickým složením, je negativně ovlivněna obsahem uhlíku. Vliv legur může být z pohledu svařitelnosti pozitivní i negativní dle daného prvku a jeho množství. S ohledem na skutečnost, že každou korozivzdornou ocel řadíme do kategorie vysocelegovaných materiálů je jasné, že se můžeme potýkat s jistými komplikacemi.

Korozivzdorné oceli řadíme do 4 základních skupin dle jejich mikrostruktury: [6]

a) Feritické oceli

- Cr, Cr-Mo

b) Martenzitické oceli

- Cr, Cr-Mo + C (C ve zvýšeném množství až do 1,2 hmot %)

c) Austenitické oceli

- Cr-Ni + Mo, Mn

d) Austeniticko - Feritické duplexní oceli

Dle uvedeného rozdělení jsme schopni kategorizovat nejen svařitelnost korozivzdorných ocelí, pro přesné zařazení do konkrétní kategorie lze použít např. konstituční Schaefflerův

diagram. Vlastnosti a struktura vysocelegovaných materiálů jsou silně ovlivněny množstvím a druhem legujících prvků. Z pohledu struktury je můžeme rozdělit na prvky feritotvorné a prvky austenitotvorné. Feritotvorné prvky Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb a V zužují v rovnovážném diagramu oblast γ . Austenitotvorné prvky C, Ni, Cu, Mn, N oblast γ naopak zvětšují.

Schaefflerův diagram zahrnuje vliv koncentrace jednotlivých chemických prvků za pomoci chromového a niklového ekvivalentu. Oba ekvivalenty zohledňují intenzitu vlivu jednotlivých prvků použitými koeficienty, tj. některé prvky jsou více feritotvorné (austenitotvorné), než jiné prvky, a proto jsou násobeny koeficienty větší velikosti.

Výpočet chromového ekvivalentu pro EN 1.4512 – osa x v Schaefflerově diagramu [6]:

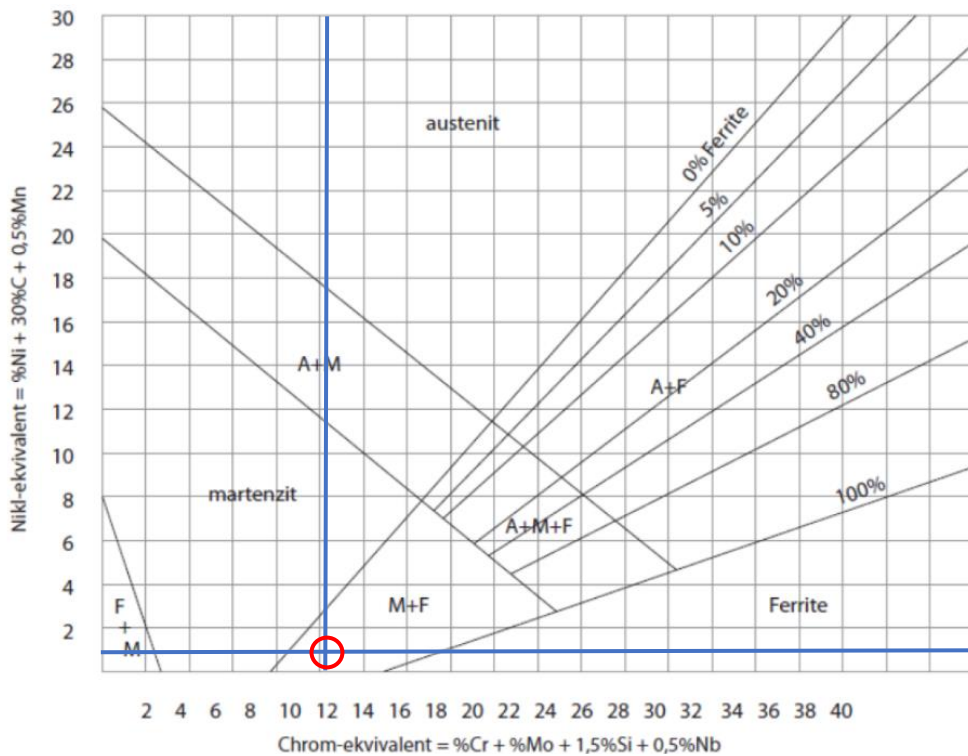
$$Cr_E = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (1.1)$$

$$Cr_E = 11,5 + 0 + 1,5 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0 = 12,25 [\%]$$

Výpočet niklového ekvivalentu pro EN 1.4509 – osa y v Schaefflerově grafu [6]:

$$Ni_E = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (1.2)$$

$$Ni_E = 0 + 30 \cdot 0,015 + 0,5 \cdot 0,5 = 0,7 [\%]$$



Obrázek 1: Schaefflerův konstituční diagram [6]

Dle odhadu z Schaefflerova diagramu můžeme očekávat feriticko - martenzickou strukturu zkoumané oceli, ve skutečnosti je ocel čistě feritická se sníženým obsahem C + N. Odhad diagramu není tedy příliš daleko od skutečnosti. S ohledem na feritickou strukturu je ocel feromagnetická s citlivostí ke křehnutí v důsledku růstu zrna po svařování. Ocel je doporučeno svařovat tak, aby bylo minimalizováno vnesené teplo (např. LBW nebo EBW). Ke svařování není vhodné používat ochrannou atmosféru

dusíku. Jedná se o materiál vhodný ke tváření za studena používaný v automobilovém i obecně strojním průmyslu. [7]

Feritické korozivzdorné oceli

Jsou charakteristické vysokou žáruvzdorností (až do 1 100 °C), dobrou korozivzdorností a odolností vůči korozi při napětí. Mezi nevýhody tohoto druhu oceli řadíme nízkou plasticitu, nízkou mez kluzu a sklon ke křehnutí. Feritické korozivzdorné oceli nejsou kalitelné, nedochází u nich k alotropické přeměně $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

Při svařování dochází k růstu zrna v TOO vedoucí ke ztrátě houževnatosti. Typické chemické složení je 10,5 až 30 % Cr, 0 až 5 % Ni, 0 až 3 % Mo, max 0,25 % C. Svařitelnost dělíme dle chemického složení:

$\Sigma C + N \leq 0,04 \%$ - feritické oceli se sníženým obsahem $C + N$

Struktura je čistě feritická, svařování je prováděno bez předehřevu, v TOO dochází k hrubnutí zrna a v jeho důsledku k poklesu vrubové houževnatosti. Pro minimalizaci tohoto jevu je nutné minimalizovat tepelný příkon. Tepelné zpracování nebývá obvykle aplikováno.

$C \leq 0,08 \%$

Při svařování bez předehřevu hrozí vznik martenzitické struktury v TOO, doporučená teplota předehřevu pro tloušťky dílů nad 6 mm je 100 až 250 °C. V oblasti přehřátí TOO při přesažení teploty 900 °C dochází k hrubnutí zrna a zkřehnutí. Je doporučováno minimalizovat tepelný příkon a aplikovat interpass teplotu při svařování vícevrstých svarů. Zkřehnutí je způsobeno precipitací probíhající v rozmezí teploty 450 až 525 °C. σ fáze vzniká v rozmezí 500 až 800 °C. Mezikrystalická koroze hrozí u ocelí s obsahem Cr nad 13 %. Po svařování je nutné aplikovat popouštění při teplotě 750 až 850 °C. [8]

Martenzitické korozivzdorné oceli

Vyznačují se širokým rozmezím pevnosti, trpí sklonem k popouštěcí křehkosti, vodíkové křehkosti, koroznímu praskání pod napětím a vzniku trhlin za studena. Poskytují vysokou pevnost za vysokých teplot (nad 600 °C). Při rostoucím obsahu uhlíku dochází ke zhoršení svařitelnosti. Díky martenzitické struktuře může být prováděno tepelné zpracování kalením a popouštěním. Tvrdost je závislostí chemického složení, obvykle cca 60 HRC. Obvyklé chemické složení je 11 až 17 % Cr, 0 až 3 % Ni, 0 až 2 % Mo, 0,1 až 1,2 % C.

Martenzitické oceli jsou přehřívány na teplotu cca 250 °C s následným interpassem a dohřevem. Teplotní zpracování svarů musí být prováděno pod teplotou A_{c1} . Tuhé a tlustostěnné svařence musejí být žháný okamžitě po vyhotovení svarů nebo musí být udržena jejich teplota cca 150 °C. [8]

Austenitické korozivzdorné oceli

Disponují velmi dobrou svařitelností při dodržení specifických podmínek. Jsou korozně odolné všem druhům korozních prostředí a celkově vykazují vyšší korozivzdornost než feritické a martenzitické oceli. Austenitické oceli často obsahují 2 až 8% feritu. Austenitické oceli jsou houževnaté, dobře tvárné s vysokou tažností a vysokou vrubovou houževnatostí i za nízkých teplot až do tzv. kryogenní oblasti. Austenitické oceli jsou taktéž žáruvzdorné do vysokých teplot, díky čemuž mají velmi široký rozsah pracovních teplot. Z důvodu vyšší teplotní roztažnosti a zhoršené tepelné vodivosti vůči feritu jsou austenitické oceli náchylné k tvorbě trhlin za tepla, jejichž příčinou je přítomnost prvků tvořících nečistoty S, P, příp. zvýšení množství určitých legujících prvků: např. Si, Ti, Nb. Dalším rizikem svařování je vznik mezikrystalické koroze z důvodu precipitace karbidů chromu na hranicích zrn a při vysokém obsahu Cr, (Mo či Si) vznik σ fáze vedoucí ke zkřehnutí. Typické chemické složení je 16 až 28 % Cr, 6 až 34 % Ni, 0 až 6 % Mo, max 0,2 % C.

Pro minimalizaci vad je doporučeno svařování bez přehřevu s maximálním tepelným příkonem do $15 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ a maximální teplotou interpass 180 °C, tím je omezeno celkové vnesené teplo do svařence – viz problematika vzniku trhlin za tepla. Tepelné zpracování nebývá u austenitických ocelí obvykle aplikováno, případně se jedná o rozpouštěcí žhání s prudkým ochlazením ve vodě aplikovaným pro potlačení MKK. [6]

Duplexní feriticko – austenitické oceli

Poskytují skvělou odolnost vůči důlkové i štěrbinové korozi, jsou vysoce odolné korozi pod napětím a koroznímu praskání. Duplexní A-F oceli disponují vysokou mezí pevnosti, nejsou tolik náchylné na trhliny za tepla ani na mezikrystalickou korozi. Svařitelnost je možná všemi standardními metodami svařování.

Cca polovina (40 až 70 %) struktury je tvořena feritem, zbývající část austenitem. S rostoucí rychlostí ochlazování roste podíl feritu. Duplexní oceli nejdříve tuhnou ve feritické struktuře, až poté narůstá na hranicích feritických zrn primární a sekundární austenit.

Rizikové je precipitační zkřehnutí v oblasti teploty 450 °C kde vzniká σ fáze, Lavesova fáze, fáze chí a epsilon. Při teplotách nad 650 °C precipitují karbidy chromu, které mohou způsobit vznik MKK. Standardní chemické složení je 19 až 27 % Cr, 1 až 7 % Ni, 0 až 5 % Mo a 0,1 až 0,3 % N.

Pro zachování kvality svaru je nutné limitovat maximální tepelný příkon na 5 až 15 $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, teplota interpass by neměla přesáhnout 150 °C (v některých případech až 200 °C). [8]

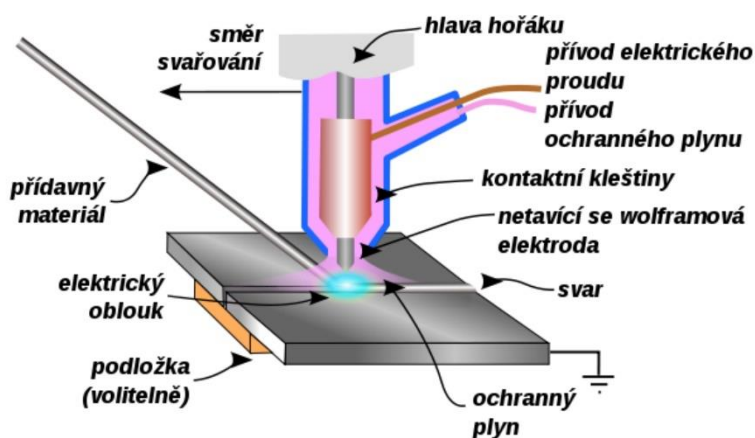
3.3. Svařování elektrickým obloukem

Jedná se o technologii tavného svařování, která pro vytvoření svarové lázně využívá teplo vyprodukované hořením elektrického oblouku.

Technologie se vyznačuje nízkou náročností investičních nákladů a slušnou kvalitou. V průmyslu se jedná o nejrozšířenější svařovací metodu svařování železných i neželezných kovů a slitin. Do této kategorie můžeme zařadit technologie MIG (metoda 131 dle ČSN EN ISO 4063), MAG (135), TIG (141) či ruční svařování obalenými elektrodami (111) nebo automatické svařování pod tavidlem (121). [9] Z toho vyplývá, že aplikace el. oblouku je možná jak v ručním, tak i automatizovaném příp. robotizovaném režimu.

Elektrický oblouk je elektrický výboj vysoké proudové hustoty a nízkého napětí. Elektrický oblouk hoří mezi kladnou elektrodou elektrického obvodu (anodou) a zápornou elektrodou - katodou, teplota el. oblouku dosahuje teploty 6 000 až 8 000 °C. Svařovací obvod může být napájen stejnosměrným i střídavým proudem. Oxidaci svarové lázně brání ochranná atmosféra dodávaná do místa svařování v podobě plynu (inertní nebo aktivní) nebo struska vytvořená z roztaveného obalu elektrody nebo práškového tavidla zasypávajícího svarovou spáru. Používané napětí se obvykle pohybuje v rozpětí 10 až 50 V, svařovací proud v rozpětí 10 až 2 000 V. [10; 11; 12]

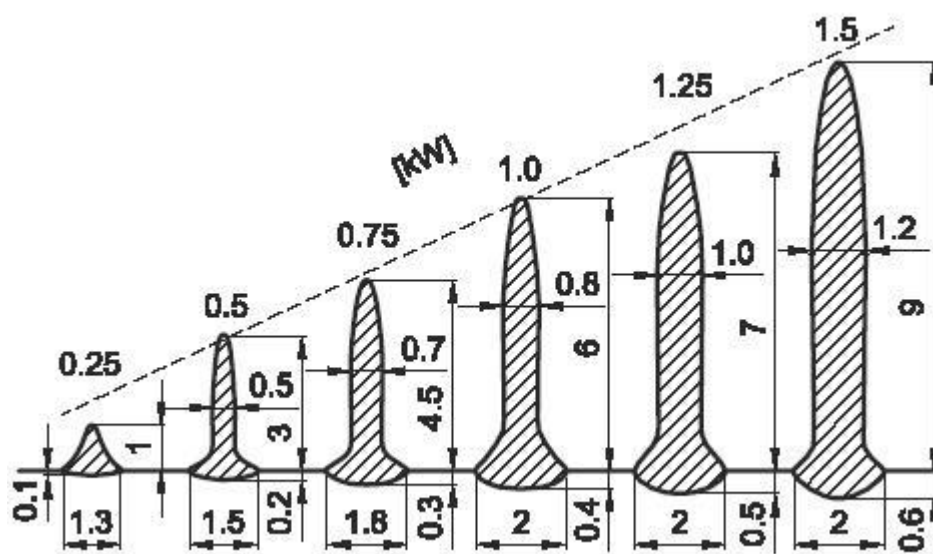
Technologie svařování jsou popisovány řadou literárních zdrojů, mnoho se lze dočíst i z tamních zdrojů. Příkladem lze uvést publikace Fyzikální a metalurgické základy obloukového svařování, J. Němec, nakladatelství SNTL; Zváranie a zvariteľnosť materiálů, I. Hrivňák, Citadella; Welding Engineering: An Introduction, Second Edition, D. H. Phillips, nakladatelství John Wiley and Sons Ltd; Fabrication and Welding Engineering, T. Roger, nakladatelství Routledge.



Obrázek 2: Schéma TIG svařování [12]

3.4. Svařování elektronovým svazkem (512 dle ČSN EN ISO 4063)

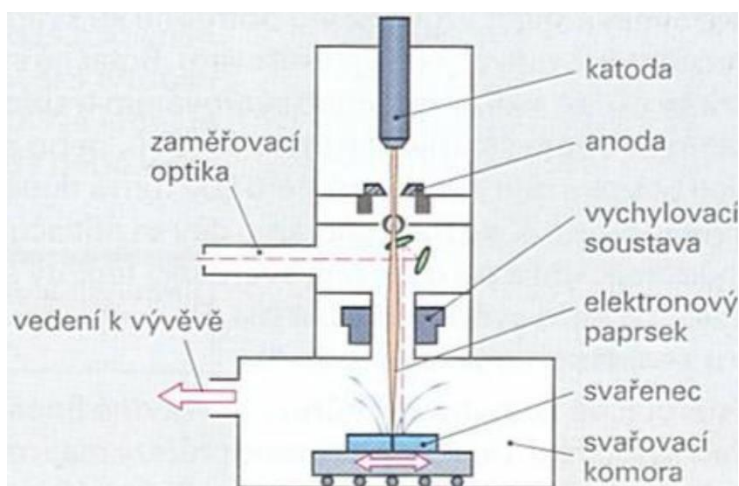
Technologie tavného svařování využívající fokusovaný svazek elektronů, který při dopadu na svařovaný materiál předává svou kinetickou energii materiálu, ve kterém se kinetická energie mění na teplo, které taví, případně odpařuje základní materiál. Energie svazku je natolik intenzivní, že dochází ke vzniku tzv. keyhole umožňující svařování velkých tloušťek stěn bez použití přídavného materiálu na jeden průchod elektronového svazku. Svary jsou charakteristické vysokým poměrem hloubky a šířky (až 25/1) s tvarem podobajícím se nožové čepeli, viz obrázek č. 3. Hloubky průvarů dosahují desítek až stovek milimetrů v závislosti na materiálu, svařovacím výkonu a svařovací rychlosti.



Obrázek 3: Schéma podoby svarů EBW [13]

Zdrojem elektronového svazku je elektronová tryska, na jejíž katodě dochází k termoemisi elektronů. Elektrony jsou následně urychlovány napětím 30 až 100 kV. Fokasace svazku je prováděna speciální elektronovou optikou. Proces svařování probíhá bez ochranné atmosféry ve vakuu za tlaku cca 10^{-2} až 10^{-3} Pa. Nutnost svařování ve vakuu značně omezuje maximální možné velikosti svařenců, které se musejí nacházet ve svařovací komoře z níž je vzduch odčerpáván, a kde je vytvořeno vakuum. Svařování ve vakuu s sebou nese jistá specifika, jako nemožnost svařování materiálů jako jsou: Zn, Cd či Mg, z důvodu vysoké tenze jejich par. Na druhou stranu umožňuje použití vakua svařovat i reaktivní kovy jako je např. Ti.

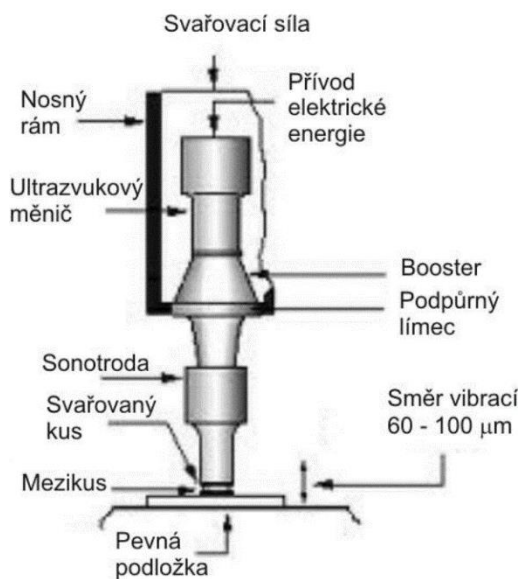
Podobně jako laserové svařování, způsobuje svařování elektronovým svazkem TOO minimální velikosti, a tedy i minimální deformace svařenců. Svařování je takřka vždy prováděno bez přídavného materiálu. [13; 14; 15; 16; 17; 18]



Obrázek 4: Schéma EBW [18]

3.5. Ultrazvukové svařování (41)

Ultrazvukové svařování využívá mechanického kmitání o vysoké frekvenci, funkčně se jedná v podstatě o třecí svařování se vzájemným mikro pohybem. Svařované díly jsou k sobě vzájemně tlačeny, jeden díl je statický, zatímco druhý je rozkmitáván vysokou frekvencí s malou amplitudou kmitů. Vzájemný pohyb dílů způsobuje tření a nárůst teploty. V místě vzájemného styku dochází k plastické deformaci a následnému promísení materiálu, a tedy vzniku svaru. Oblast plastické deformace zasahuje pouze do cca 5% celkové tloušťky spoje. Protože je ke vzniku svarového spoje vyvozeno tlakové napětí, řadíme metodu do skupiny tlakového svařování.

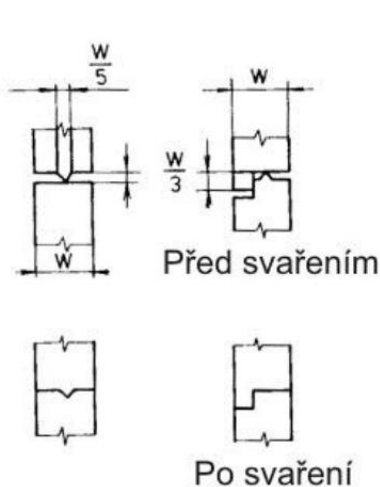


Obrázek 5: Schéma ultrazvukového svařování [19]

Ultrazvukový měnič je se svařencem propojen sonotrodou sloužící k přenosu kmitů do materiálu. Sonotroda dále slouží ke zvětšení amplitudy kmitů jejichž frekvence se obvykle pohybuje v rozmezí 10 až 100 kHz.

Ultrazvukové svařování umožňuje spojování odlišných materiálů, jejichž svaření může být dokonce snazší než dvou totožných materiálů. Ultrazvukové svařování umožňuje zpracování i materiálů s velkou tepelnou vodivostí např. Cu, Al.

Svarové plochy jsou opatřeny výčnělky pro koncentraci plastické deformace a vzniklého tepla. Velikost TOO je v porovnání s tavným svařováním menší a zároveň lze svařovat materiály nezávisle na jejich elektrické vodivosti.



Obrázek 6: Vliv tvaru spoje na výsledný svar ultrazvukového svařování [19]



Obrázek 7: Vliv tvaru spoje na výsledný svar UT svařování [19]

Komplikací ultrazvukového svařování je omezení velikosti svařenců z důvodu potřebné síly k rozkmitání větších dílů, prakticky lze svařovat jen velmi tenké díly do cca 1 až 2 mm. Technologie je využívána majoritně pro svařování plastů. Zároveň je pro každý svar nutné zajištění konkrétní sonotrody a dalších přípravků. [19; 20; 21]

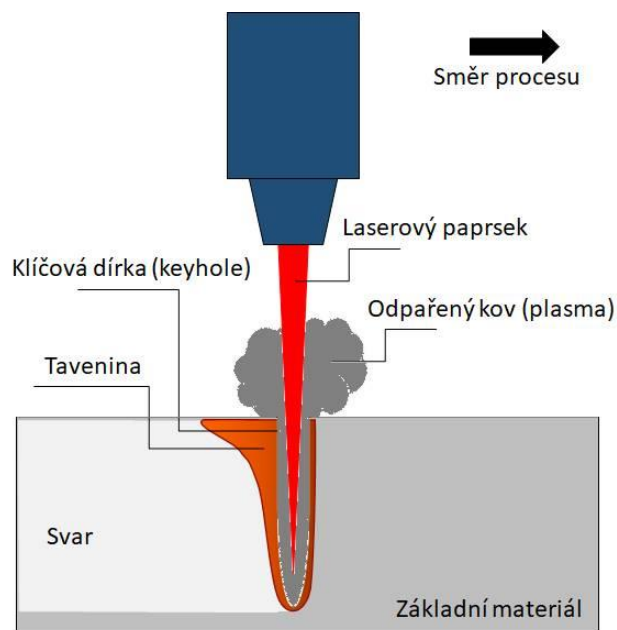
3.6. Laserové svařování (52)

Svařování laserovým paprskem řadíme k pokročilým výrobním technologiím tavného svařování. Díky minimální velikosti spotu dopadajícího laserového paprsku je energie vysoce koncentrovaná a dochází k rychlému natavení základního materiálu, díky čemuž v porovnání s ostatními konvenčními metodami minimalizujeme energetické ztráty odvodem tepla mimo oblast svaru a zároveň mechanicky i chemicky negativně ovlivněnou TOO. Metoda umožňuje svařování materiálů s vysokou teplotou tání, svařování za vysoké rychlosti a přesnosti.

Nutno však podotknout, že minimalizace velikosti spotu paprsku, respektive velikosti svaru přináší také požadavky na kvalitní přípravu svarové spáry a nutnost zajištění precizního vzájemného pozicování paprsku a svařovací spáry, v opačném případě může docházet ke vzniku vad svaru. [2; 3]

Označení Laser je zkratkou pro anglický pojem „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, tedy v českém znění „Zesilování světla stimulovanou emisí záření“.

Laserový paprsek je uměle vytvořené elektromagnetické vlnění (světelný paprsek),



Obrázek 8: Schéma LBW [23]

kteří může být za pomoci optické soustavy zaostřeno na spot malé velikosti. Díky provedené fokusaci paprsku je energetická intenzita paprsku natolik vysoká, že dokáže roztavit či dokonce odpařit plastové, kovové i keramické materiály.

Lasery jsou hojně využívány v řadě průmyslových aplikací, a to nejen pro svařování, ale také pájení, řezání, značení, čištění nebo také v aditivních aplikacích. [22; 23]

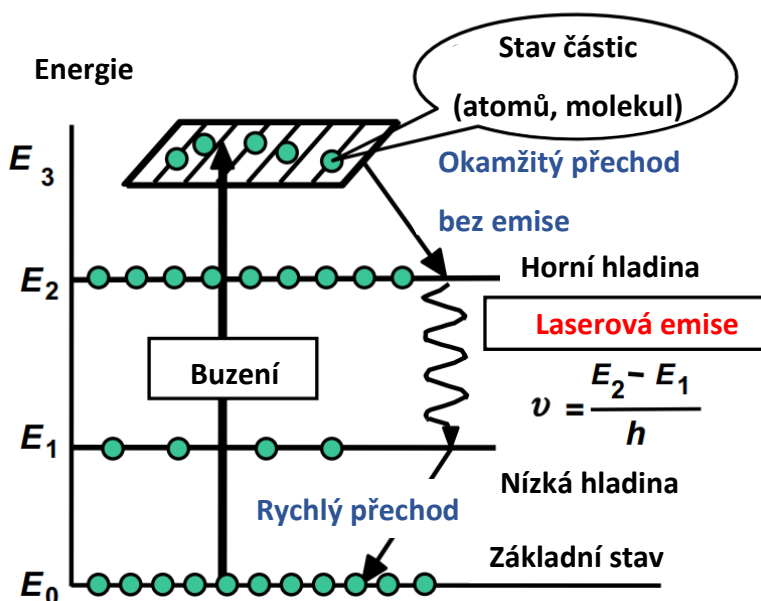
4. ZÁKLADNÍ POJMY PRO LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

4.1. Laserový paprsek

Jedná se o elektromagnetické vlnění, existující pouze v uměle vybuzeném stavu. Laserový paprsek je charakteristický svou monochromaticností, extrémně malým rozsahem frekvenčního spektra a vynikající souběžností jednotlivých paprsků (tzn. velmi malou divergencí) včetně vysokého stupně jejich koherence. Uvedené charakteristiky jsou klíčem pro možnost zaostření paprsku do malého spotu za pomoci soustavy optických čoček. Zaostření paprsku zvyšuje jeho vysokou energetickou hustotu.

Vlnová délka laserového paprsku je dána aktivním prostředím, ve kterém je paprsek emitován. Rozdělení laserů včetně rozsahu jejich vlnových délek je uvedeno v kapitole 6. [22]

Vznik laserového paprsku

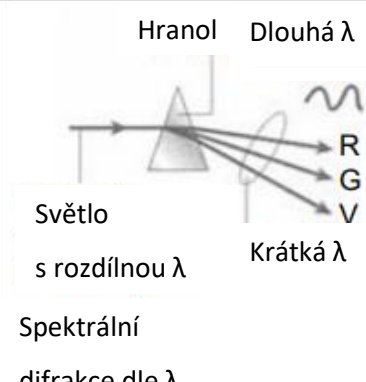
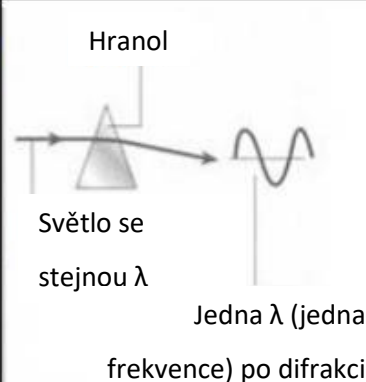
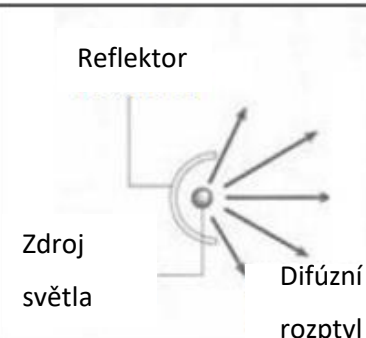
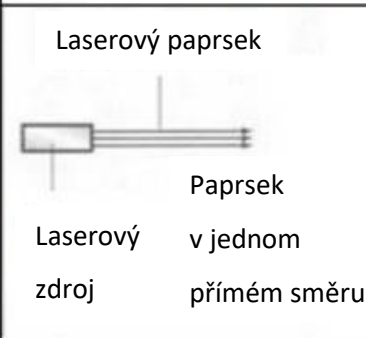

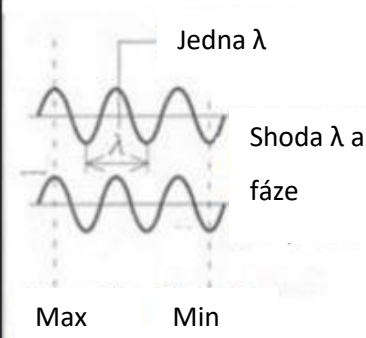
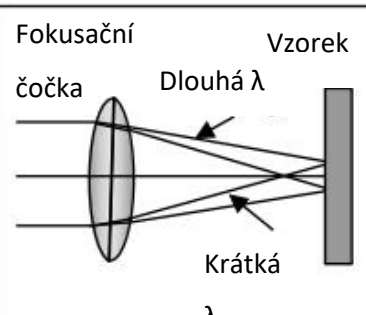
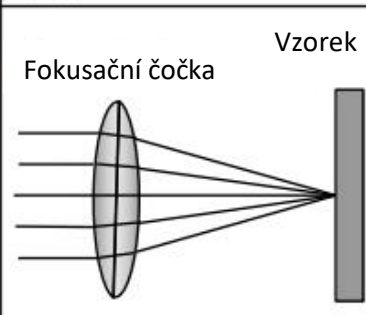


Obrázek 9: Schéma buzení a vzniku emise laserového paprsku [22]

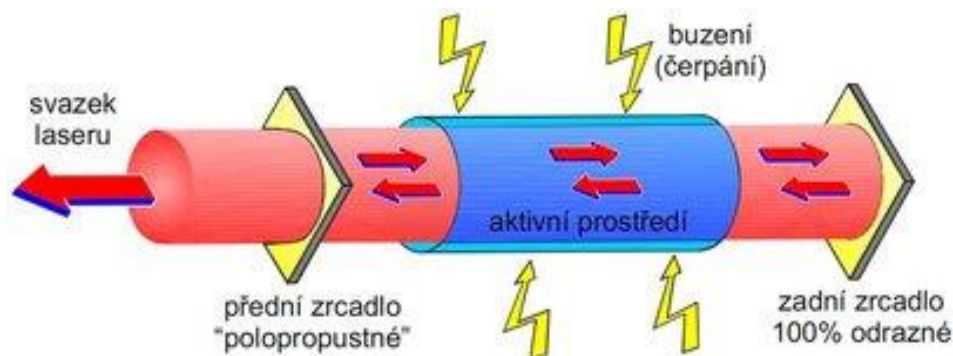
vyšší hladinu (E_3), ze které okamžitě sestupují do energetické hladiny E_2 bez jakékoli emise, ve které taktéž neseťvávají příliš dlouho. Při sestupu do své přirozené energetické hladiny E_0 emitují totožné částice, jakými byly buzeny (obvykle fotony), čímž vzniká laserové záření. Emise laserového záření využívá minimálně tři energetických hladin. Princip emise je znázorněn na obrázku č.9.

Klíčovým dějem pro vznik laserového paprsku je stimulovaná emise fotonů probíhající v aktivním prostředí laseru. Jedná se o děj, při kterém jsou elektrony atomů buzeny fotony nebo jinými částicemi (plazma, elektronové paprsky), které jim předávají část své kinetické energie. Vybuzené elektrony se přesouvají na energeticky

Tabulka 1: Porovnání vlastností přirozeného světla a laseru [22]

| Položka | Přirozené světlo | Laser | Aplikace |
|---|--|--|--|
| ① Monochromaticita |  <p>Hranol Dlouhá λ Světlo s rozdílnou λ Krátká λ R G V Spektrální difrakce dle λ</p> |  <p>Hranol Světlo se stejnou λ Jedna λ (jedna frekvence) po difrakci</p> | <p>Spektroskopická analýza Izotropní separace</p> |
| ② Směr |  <p>Reflektor Zdroj světla Difúzní rozptyl</p> |  <p>Laserový paprsek Papřsek v jednom přímém směru Laserový zdroj</p> | <p>Optická komunikace Laserové skenování Optické disky Laserové radary</p> |
| ③ Koherence |  <p>Zdroj světla Mnohostranná emise světla</p> |  <p>Jedna λ Shoda λ a fáze Max Min</p> | <p>Holografie Přesné měření díky interferenčním proužkům</p> |
| ④ Zaostření / Vysoká intenzita výkonu |  <p>Fokusační čočka Dlouhá λ Krátká λ Vzorek</p> |  <p>Fokusační čočka Vzorek</p> | <p>Laserové zpracování Laserový skalpel Laserové zbraně</p> |

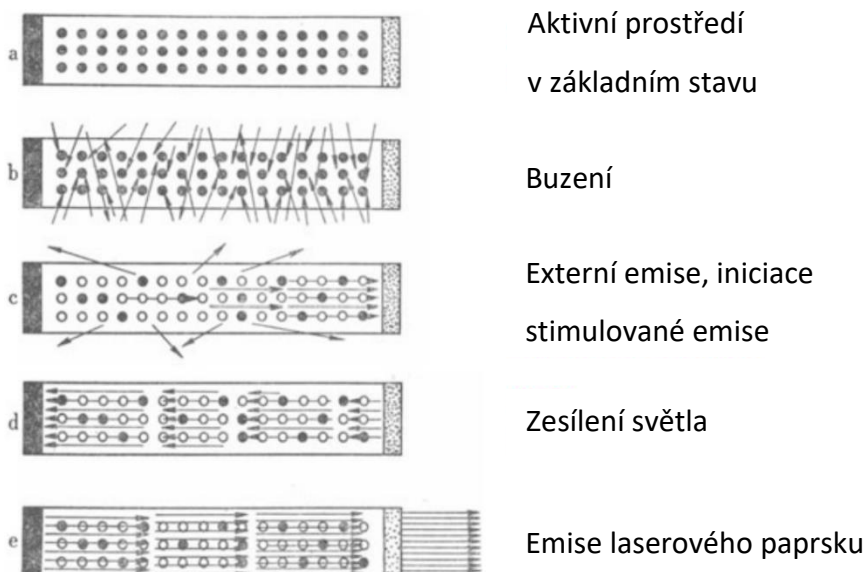
Nezbytnou součástí laserového systému je taktéž optický rezonátor s minimálně dvěma zrcadly. Jedno zrcadlo je pro danou vlnovou délku nepropustné a druhé částečně nepropustné. Rezonátor ve spojení s buzením zajišťují vznik a zesilování inverzní populace elektronů potřebných pro vznik dostatečně intenzivního paprsku. Inverzní stav popisuje skutečnost, při které se v daný čas nachází více elektronů ve vybuzeném stavu než ve stavu



Obrázek 10: Schéma tvorby laserového paprsku [24]

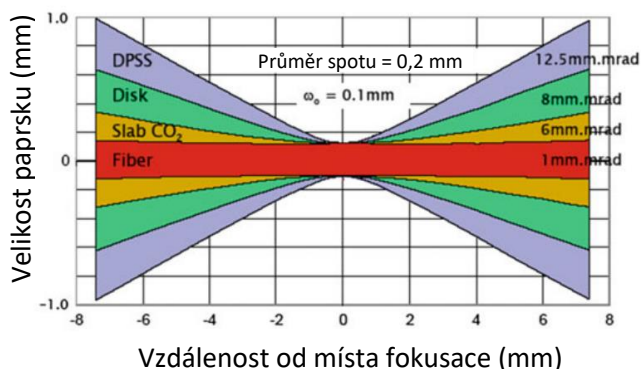
přirozeném (stavu nižší energetické hladiny). Emitované fotony odražené od zrcadel na konci optického rezonátoru opakovaně prochází optickým rezonátorem a zajišťují lavinový děj další emise fotonů.

Inverzní populace elektronů může nastat pouze v určitých materiálech, které při aplikaci v laserovém zdroji nazýváme aktivní prostředí, které je podrobněji popsáno v kapitole 6. [22; 24]



Obrázek 11: Schématické znázornění rezonanční kavity se dvěma zrcadly a emise laserového záření za pomoci excitace a stimulované emise v pevnolátkovém laseru [22]

4.1.1. Kvalita laserového paprsku

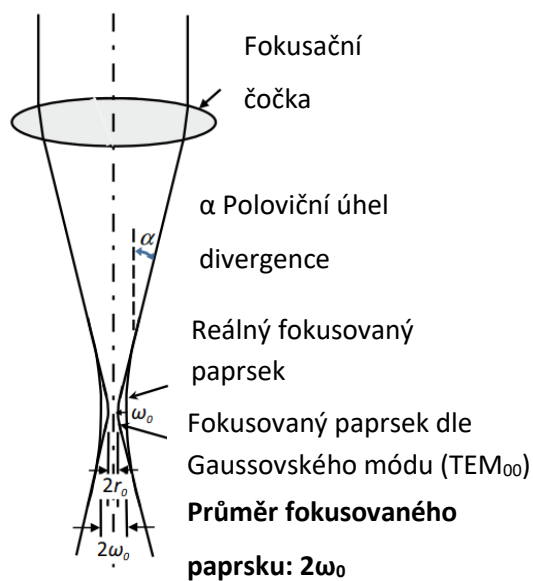


Obrázek 12: Porovnání BPP dle typu laseru [22]

Kvalita paprsku bývá popisována anglickým pojmem „Beam parameter product“ se zkratkou BPP, v českém znění „Parametr paprsku“. Obvykle je kvalita paprsku klasifikována konstantou M^2 , ta vyjadřuje poměr velikosti reálného spotu vůči spotu teoretickému:

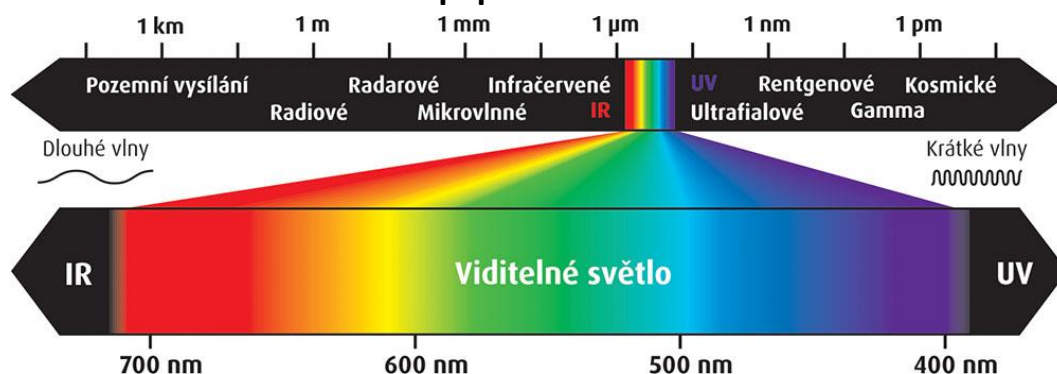
$$M^2 = \frac{\omega_0}{r_0} = \alpha \omega_0 \frac{\pi}{\lambda} = BPP \frac{\pi}{\lambda} \quad (2.1) \quad [22]$$

Kvalita laserového paprsku hodnotí jeho divergenci. Paprsek o vyšší kvalitě má nižší divergenci, a tedy lepší schopnost být fokusován na malý spot. V souvislosti s konkrétní aplikací je volena potřebná hodnota kvality paprsku.



Obrázek 13: Schéma vlivu divergence laserového paprsku [22]

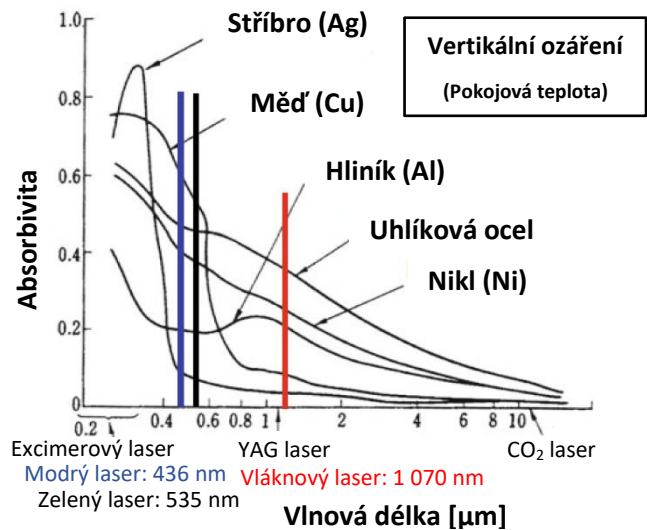
4.1.2. Vlnová délka laserového paprsku



Obrázek 14: Kategorizace elektromag. záření na základě vlnové délky [26]

Mezi jednu z dalších charakteristik laserového paprsku patří vlnová délka. Ta zásadně ovlivňuje absorpci laserového paprsku ozářeným materiálem, rozdíly mohou být i v řádu desítek procent, a to zejména u stříbra a mědi. Většina průmyslově aplikovaných laserů spadá do oblasti infračerveného spektra záření,

tj do rozmezí 760 nm až 1 mm. Obrázek č. 15 znázorňuje závislost absorpitivity daného materiálu na vlnové délce záření. V případě aproximace můžeme konstatovat, že s rostoucí vlnovou délkou záření klesá absorpce materiálu, je tedy zřejmé, že cílová hodnota vlnové délky laserového záření je cca 280 nm. Volba laseru správné



Obrázek 15: Závislost absorpitivity na vlnové délce [22]

vlnové délky je důležitá zejména při svařování stříbra a mědi, jejichž závislost absorpitivity na vlnové délce je značně strmá a nelineární. Zejména z důvodu potřeby zpracování těchto materiálů a jejich slitin byly vyvinuty lasery modré (436 nm) a zelené (535 nm) barvy. Neduhem těchto laserů je snížená účinnost při emisi paprsku, pro svařování standardních konstrukčních materiálů je proto stále upřednostňováno použití laserů standardní vlnové délky cca 1 000 nm. [25; 26]

Tabulka 3: Rozdělení laserových zdrojů dle vlnové délky paprsku [22]

| Vlnová délka paprsku dle typu laseru | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|-----------|----------------|-----------------------|
| | Diodový laser | Diskový laser | YAG laser | Vláknový laser | CO ₂ laser |
| Vlnová délka [nm] | 808 ÷ 980 | 1030 | 1064 | 1064 | 10 600 |

5. POPIS KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

5.1. Laserový zdroj

Laserový zdroj je zařízení, ve kterém je emitováno laserové záření. Jeho hlavními součástmi jsou optický rezonátor s aktivním prostředím, buzení, prvky regulace výkonu a vnitřní chladicí okruh. Intenzita laserového paprsku je řízena velikostí buzení. Požadovaná velikost buzení je zjištěna dle online měřené intenzity paprsku v optickém rezonátoru. Laserový paprsek opakovaně prochází optickým rezonátorem díky odrazu z koncových zrcadel, z nichž je jedno se 100 % odrazivostí, zatímco druhé s odrazivostí cca 99 %, zbylé 1 % paprsku zrcadlem prochází do snímače monitorujícího intenzitu

paprsku. Na základě této informace dochází k regulaci buzení vedoucí ke snížení či zvýšení intenzity laserového paprsku. Výstupem z laserového zdroje je a) optické vlákno b) pevný optický člen c) procesní hlava.

Účinnost laserového zdroje bývá obvykle v rozmezí 20 až 30 %, je proto nutné zajištění intenzivního chlazení, které bývá zajištěno externím chladičem. V případě laserů velmi malých výkonů bývá použito vzduchového chlazení, to ale není případ výkonových svařovacích laserů. V případě některých výrobců laserů bývá součástí laserového zdroje chlazení procesní hlavy, tzn. laserový zdroj disponuje vnitřním chladícím okruhem pro procesní hlavu. Požadovaná teplota chladící kapaliny bývá obvykle o několik stupňů vyšší, než je tomu pro laserový zdroj, v případě podchlazení hrozí riziko kondenzace vody na prvcích optické soustavy procesní hlavy vedoucí k jejich potenciálnímu poškození vlivem působení laserového paprsku. Nedostatečné chlazení zdroje vede k posunu spektrálních čar a následnému přerušování generování laserového záření. [22]

Podoba laserového zdroje je z velké části dána typem aktivního prostředí, základní rozdělení aktivních prostředí je na: plynné a pevnolátkové. Detailnější popis je uveden v kapitole 6. Rozdíl velikosti zdrojů může být i násobný, např. laserový pevnolátkový diskový zdroj Trumpf TruDisk s výkonem 3kW má rozměry 1175 x 1430 x 725 mm,[27] zatímco pevnolátkový diodový zdroj Laserline LDM o stejném výkonu má rozměry 483 x 220 x 636 mm. Zdroj Laserline je tedy více než 18krát menší. [28]

5.1.1. Účinnost

Účinnost laserových zdrojů je do značné míry dána jejich aktivním prostředím, shrnutí účinnosti jednotlivých typů laserových zdrojů je uvedeno v tabulce č. 3. Účinnost většiny laserů nepřesahuje 25 %, přičemž zbývající energie disipuje v odpadní teplo a je odváděna chlazením. Při výběru typu laserového zdroje je potřebné zvážit nejen jeho účinnost, ale také absorbitivitu dané vlnové délky svařovaným materiálem, případně také kvalitu paprsku.

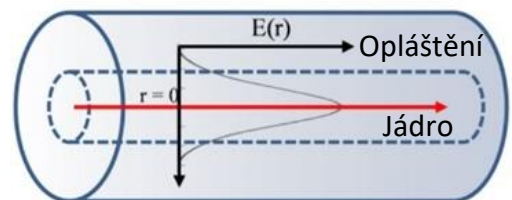
Tabulka 4: Rozdělení laserů dle účinnosti [22]

| Účinnost laserových zdrojů dle typu | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|--------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------------|----------------|
| | YAG laser | Zelený laser | CO ₂ laser | Diodový laser | Diskový laser | Diodový laser modrý | Vláknový laser |
| Účinnost [%] | 1 ÷ 4 | 5 ÷ 20 | 10 ÷ 20 | 10 ÷ 20 | 15 ÷ 25 | 20 ÷ 50 | 20 ÷ 50 |

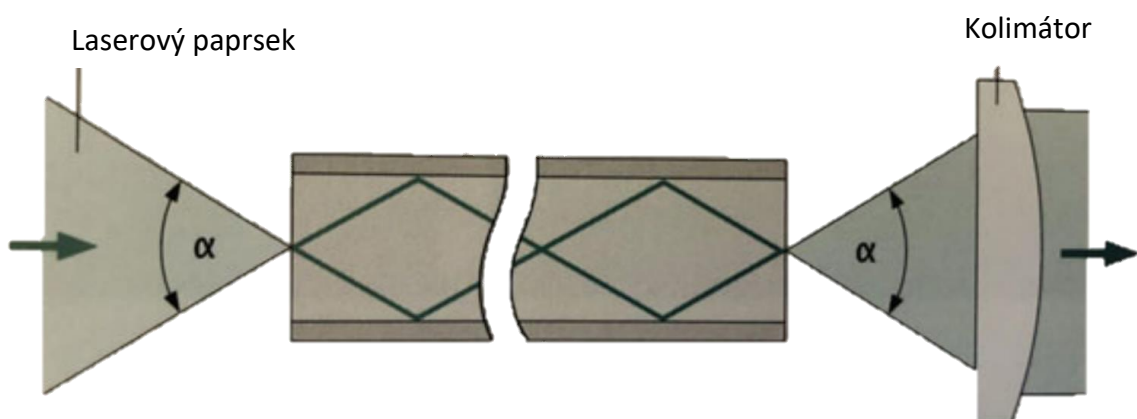
5.2. Optické vlákno

Slouží jako flexibilní součást k propojení laserového zdroje a procesní hlavy. Optické vlákno umožňuje přenos laserového paprsku na vzdálenosti desítek metrů včetně změny směru. Používané jsou také trvale pohyblivé aplikace, kde se procesní hlava pohybuje v pracovním prostoru a optické vlákno ji spojuje se staticky umístěným laserovým zdrojem. Jádrem optického vlákna (základ konstrukce) je vyrobeno z oxidu křemičitého (SiO_2), který umožňuje přenos elektromagnetického vlnění o vlnové délce 800 až 1 600 nm. Primárním určením optických vláken je přenos viditelného záření o vlnové délce 400 až 700 nm, avšak díky podobné vlnové délce, která působí v tzv. blízké IR oblasti je použití možné i u většiny laserových záření. S rostoucí vlnovou délkou narůstají ztráty, a to je důvodem, proč jsou např. plynové CO_2 lasery používány bez optických vláken (vlnová délka jejich záření je 10 600 nm).

Optické vlákno se skládá z optického jádra s vynikající vodivostí záření a opláštění jádra (cladding) a ochranného obalu (coating). Paprsek elektromagnetického vlnění je v optickém jádře udržen díky principu totálního odrazu na rozhraní jádra a jeho opláštění. Charakteristickou hodnotou optického vlákna je průměr jádra a celková délka vlákna. Mezi další již méně významné charakteristiky patří minimální poloměr ohybu vlákna a způsob připojení. Samostatnou kapitolou jsou optická vlákna vláknových laserů, u kterých plní optické vlákno nejen transportní funkci, ale také funkci aktivního prostředí, viz kapitola 6.3.3. [22; 29]



Obrázek 16: Modální rozložení pole v jednoduchém optickém vláknu, r je poloměr jádra, E je modální elektrické pole [29]



Obrázek 17: Vstup a výstup laserového paprsku do optického vlákna [22]

5.3. Procesní hlava

Procesní hlava je výstupním prvkem laserové soustavy. Laserový paprsek emitovaný v laserovém zdroji je skrz optické vlákno nebo pevný optický člen přenesen do procesní hlavy, ze které již paprsek vystupuje zaostřen na požadované místo. Procesní hlava se skládá z následujících částí: [22; 30]

- Kolimátor
 - Optický prvek umístěný na vstupu do procesní hlavy sloužící k usměrnění divergentních paprsků do rovnoběžného stavu. Usměrněním paprsku je zvýšena kvalita paprsku.
- Fokusační optika
 - Optická čočka měnící vstupující rovnoběžný paprsek na paprsek sbíhavý. Ohnisko paprsku je obvykle umístěno cca v oblasti svaru, jeho přesná pozice může být seřízena a) změnou pozice fokusační optiky v procesní hlavě b) změnou pozice celé procesní hlavy. Součástí fokusační optiky může být také zrcadlo pro změnu směru paprsku.
- Senzorická část
 - Systém snímání parametrů laserového paprsku a dalších procesních parametrů jako je např. teplota procesní hlavy a chladiwa.
- Tělo
 - Nosná část procesní hlavy, ve spodní části je umístěno výměnné krycí sklo bránící znečištění funkčních prvků procesní hlavy. Prvky procesní hlavy jsou silně závislé na dokonalé čistotě vnitřních prostor. Krycí sklo je obvykle doplněno o vzduchový nůž strhávající nečistoty směřující k ochrannému sklu procesní hlavy. Tělo může být doplněno také o trysku usměrňující proud ochranné atmosféry okolo laserového paprsku pro zabránění oxidace svarové lázně.

6. TYPY LASERŮ

6.1. Charakteristiky pro kategorizaci laserů

Svařovací i další laserové zdroje můžeme rozlišit dle řady charakteristik, mezi nejdůležitější patří: [22; 30; 31]

- a) Vlnová délka záření
- b) Typ aktivního prostředí
- c) Typ kvantových přechodů
- d) Způsob buzení
- e) Pracovní režim

Dělení dle vlnové délky

- a) Infračervené
- b) Viditelné
- c) Ultrafialové
- d) Rentgenové

Dělení dle aktivního prostředí:

- a) Plynné
- b) Pevnolátkové
- c) Polovodičové

Dělení dle způsobu buzení

- a) Elektrické (AC, DC)
- b) Radiofrekvenční (RF)
- c) Optické (lampy, diody)

Dělení dle pracovního režimu

- a) Kontinuální (CW)
- b) Pulsní a impulsní (PW)
 - a. S dlouhými impulsy
 - b. S krátkými impulsy
 - c. S velmi krátkými impulsy (pikosekundové, femtosekundové)

6.2. Plynové lasery

6.2.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je složeno ze směsi plynů podporujících stimulovanou emisi paprsku a zároveň jeho stabilizaci i chlazení. Na rozdíl od pevnolátkových laserů jsou paprsky plynových laserů méně divergentní s malou šířkou spektrálních čar, která je zajištěna vyšší homogenitou aktivního prostředí.

Aktivní prostředí obsahuje nízkou hustotu aktivních částic což má za následek špatný poměr výkonu vůči velikosti laserových zdrojů.

6.2.2. Buzení

Směs plynů aktivního prostředí o tlaku cca 35 až 50 torrů je buzena elektrickým výbojem, který způsobí tvorbu plazmy. Molekuly v plazmě zabírají odlišné stavy excitace dle Boltzmannovy distribuce. [30]

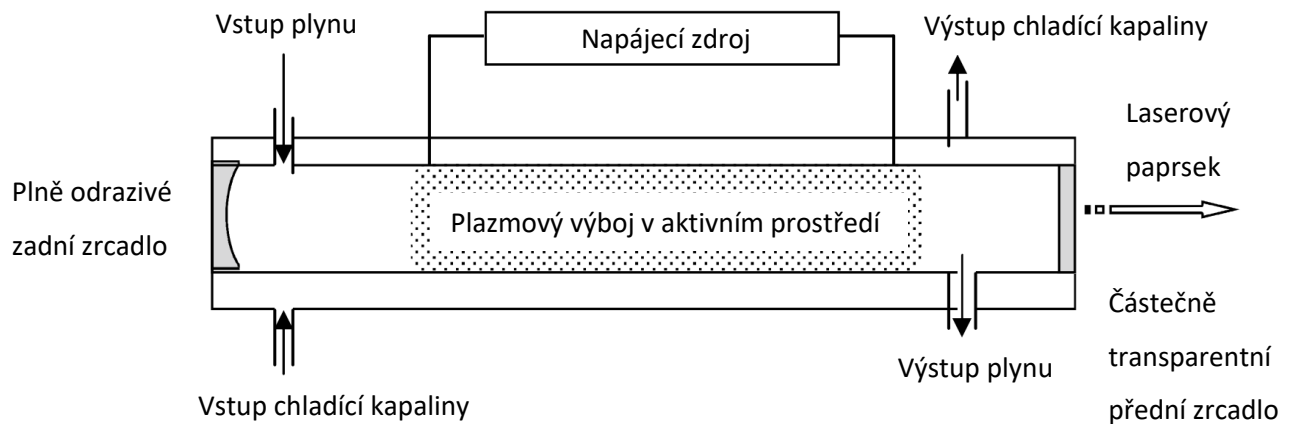
Molekuly svou energii ztratí buď formou kolize anebo formou emise fotonu, u fotonů vyzářených v optické ose rezonátoru dojde k jejich oscilaci důležité pro vznik stimulované emise záření v optickém rezonátoru. V okamžiku, kdy oscilovaný foton narazí do excitované molekuly dojde již ke stimulované emisi fotonu o stejné vlnové délce, směru a fázi. Děj stimulované emise je lavinově opakován v aktivním prostředí inverzní populace molekul, čímž dochází ke vzniku laserového záření.

Buzení může být prováděno radiofrekvenčně nebo také střídavým či stejnosměrným proudem.

6.2.3. CO₂ lasery

CO₂ lasery jsou hlavním zástupcem plynových laserů. Ve skutečnosti je aktivním prostředím CO₂ laseru nejen CO₂ (10 až 20 %), ale jeho směs s H₂ (1 až 5 %), N₂ (10 až 20 %) a He (65 %). Funkcí majoritně zastoupeného He i minoritně zastoupeného H₂ je vedení a stabilizace plazmy (chlazení), funkcí N₂ je zajištění inverzní populace a CO₂ slouží pro vznik stimulované emise. Vlnová délka emitovaného záření je 10 600 nm, tedy cca 10krát větší než u většiny pevnolátkových laserů. Vlnová délka CO₂ laseru je jeho velkým hendikepem z důvodu nemožnosti použití optického vlákna pro transport laserového paprsku. Lasery jsou proto obvykle umístěny bezprostředně u fokusační optiky, což např. pro aplikace laserových routerů vede k nežádoucímu zvýšení hmotnosti, velikosti a setrvačnosti pohybové soustavy. CO₂ lasery mohou být

použity jak pro pulzní, tak kontinuální režim. Účinnost CO₂ laseru (10 až 20 %) je závislá na kvalitě chlazení (teplotě). [22; 30]



Obrázek 18: Schéma konstrukce pomalu průtokového plynového laseru [30]

6.3. Pevnolátkové lasery

6.3.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí pevnolátkových laserů je uložené v dielektrickém krystalu nebo amorfním sklu. Mezi hlavní zástupce materiálů matrice aktivního patří:

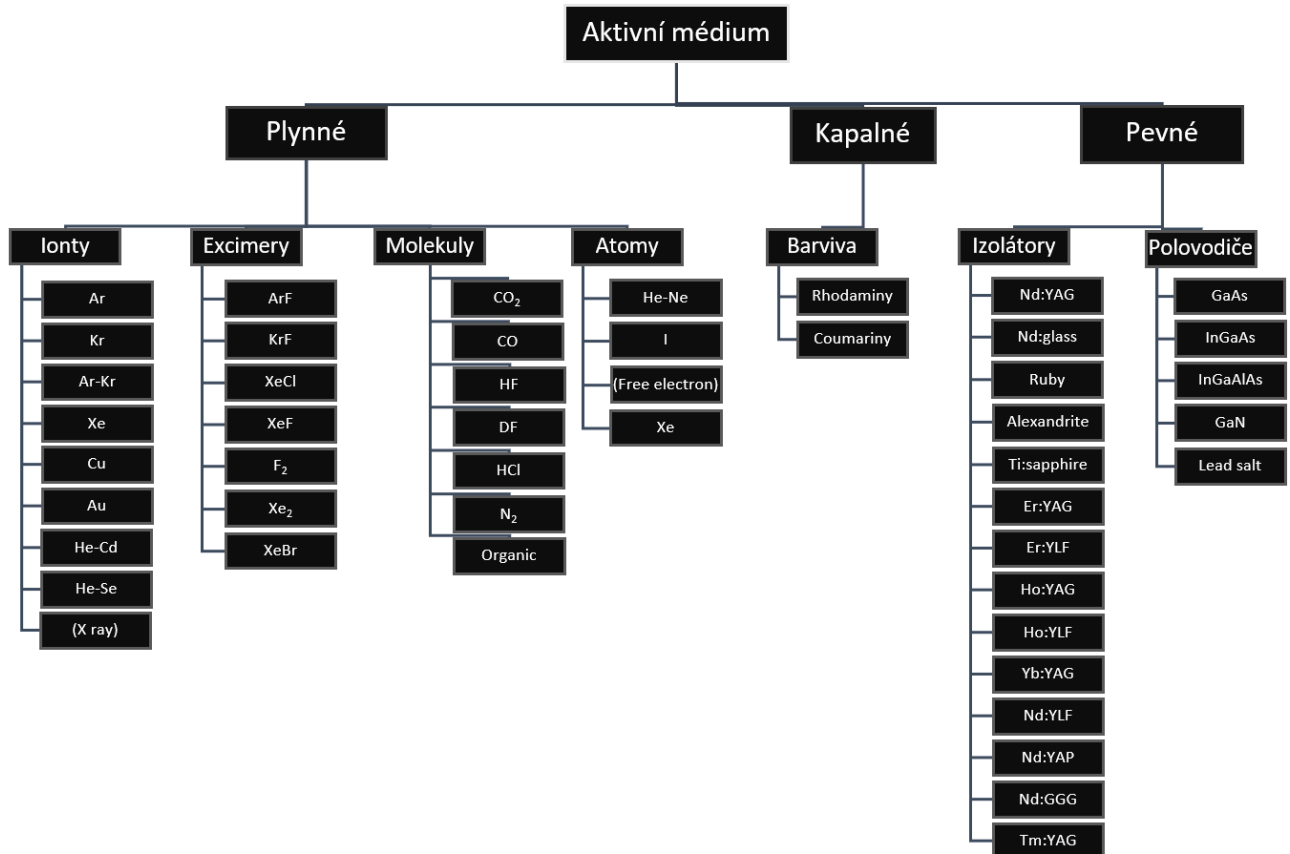
- Yttrito hlinitý granát (YAG; $Y_3Al_5O_{12}$)
- Fluorid lithno-yttritý (YLF)
- Perovskit hlinitý-yttritý (YAP; $YAlO_3$)
- Vanadičnan yttritý (YVO_4),
- Fosfát
- Křemičité sklo

Matrice aktivního prostředí jsou dopovány aktivátory, mezi hlavní zástupce aktivátorů patří:

- Trojmocný iont neodymu (Nd^{3+} :YAG),
- Trojmocný iont erbia Er^{3+} :YAG,
- Trojmocný iont ytterbia (Yb^{3+} :YAG),
- Trojmocný iont chromu (Cr^{3+} : Al_2O_3 ; Cr^{3+} : $BeAl_2O_4$),
- Trojmocný iont titanu (Ti^{3+} : Al_2O_3)

V porovnání s plynovými lasery umožňují pevnolátkové lasery delší setrvání molekul v excitovaném stavu, což umožňuje schopnost vyšší akumulace energie laserového paprsku.

Tabulka 5: Rozdělení aktivního prostředí [31]



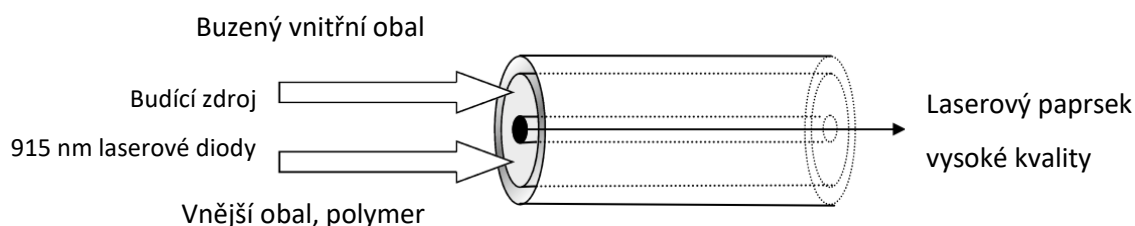
6.3.2. Buzení

Buzení pevnolátkových laserů lze provádět speciálními výbojkami, diodami nebo laserovým zářením o jiné vlnové délce. Zdroj buzení s aktivním prostředím tvoří základ laserového zdroje, který je umístěn v budící dutině. Budící dutina slouží k zpětnému odrazení odchýlených paprsků do aktivního prostředí. Výstup laserového paprsku je zajištěn zrcadlem o snížené odrazivosti, tj. část laserového záření zrcadlem prochází ven ze zdroje a je dále vedeno do a) optického vlákna b) pevného optického členu c) procesní hlavy. Výstupní zrcadlo CW laserů má odrazivost v rozmezí 90 až 99,99 %, zrcadlo PW laserů 8 až 50 %.

6.3.3. Vlákenný laser

Aktivní prostředí vláknového laseru (fiber laser) se skládá z optického vlákna. Aktivní prostředí je dopováno rebiem, ytterbiem nebo praseodymem. Buzení je zajištěno diodami přes optickou spojku přivedenou do aktivního prostředí optického

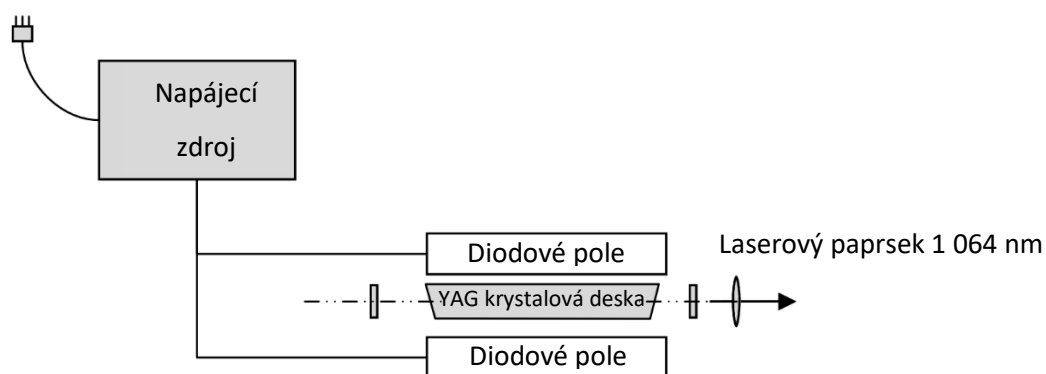
vlákna. Zrcadla, typická pro klasické konstrukční uspořádání rezonátoru, jsou zde nahrazena Braggovskými mřížkami, které jsou vytvořeny přímo na optickém vláknu. Optický rezonátor obepíná optické vlákno. Laserový paprsek má malou stopu dopadu, vysokou kvalitu a intenzitu. Vlákňové lasery mají nejvyšší účinnost, a to až 50 %. Další výhodou vlákňových laserů je jejich dlouhá životnost dosahující až 100 000 hodin, což představuje více než 11 let nepřetržitého provozu. [22; 30]



Obrázek 19: Základní struktura optického vlákna vlákňového laseru [30]

6.3.4. Nd:YAG lasery

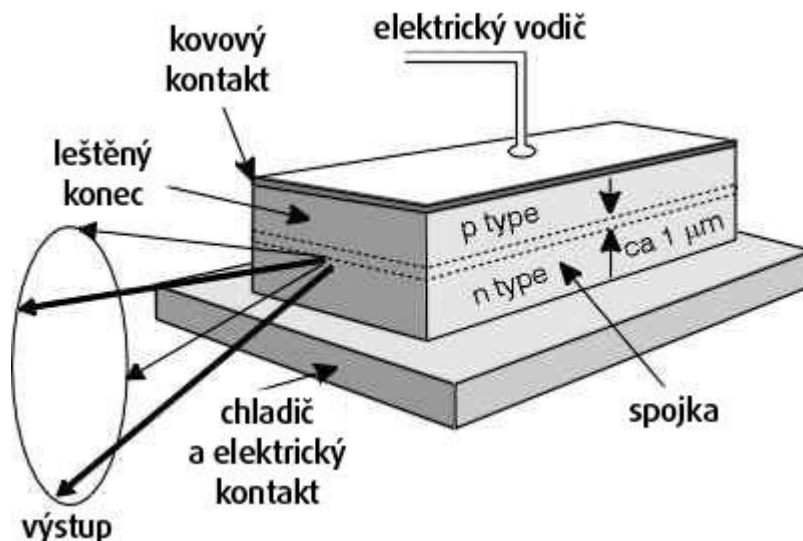
Jedná se o pevnolátkový laser, jehož označení vychází z materiálu aktivního prostředí yttrito-hlinitého granátu (YAG) dopovaného neodymovými ionty (Nd^{3+}), označení může být uvedeno také v podobě Nd:YAG. Vlnová délka záření je nejčastěji 1 064 nm. V případě obětování části účinnosti laserového zdroje jsou možné emise i záření o vlnových délkách 1440, 1320, 1120 nebo 940 nm. Dodnes jsou YAG lasery jedny z nejpoužívanějších klasických pevnolátkových laserů. YAG lasery umožňují dvě základní orientace buzení, a to buzení boční pro vyšší svařovací výkony nebo buzení zadní pro vyšší kvalitu paprsku. [22; 30]



Obrázek 20: Schéma konstrukce YAG laseru [30]

6.3.5. Diodové lasery

Aktivní prostředí je tvořeno polovodičovou diodou, která umožňuje změnu vlnové délky záření v rozmezí 808 až 980 nm modifikací chemického složení diody. Emise laserového záření vzniká v aktivním prostředí mezi vrstvou P a N.



Obrázek 21: Schéma diodového laseru [32]

Průchod elektrického proudu způsobí přechod elektronů polovodičového materiálu z vodivostního pásu do valenčního pásu, přičemž dochází k rekombinaci kladných děr a elektronů způsobující emisi fotonů (laserového záření). Laserové diody jsou vyráběné obvykle z více vrstev P – N přechodů, s rostoucí velikostí aktivního prostředí roste výkon laserového zdroje. Nejvíce používané materiály pro diodové lasery jsou GaAs a GaAlAs, které jsou používány pro všechny tři popisované vrstvy aktivního prostředí. Jednotlivé vrstvy se od sebe liší intenzitou dopování.

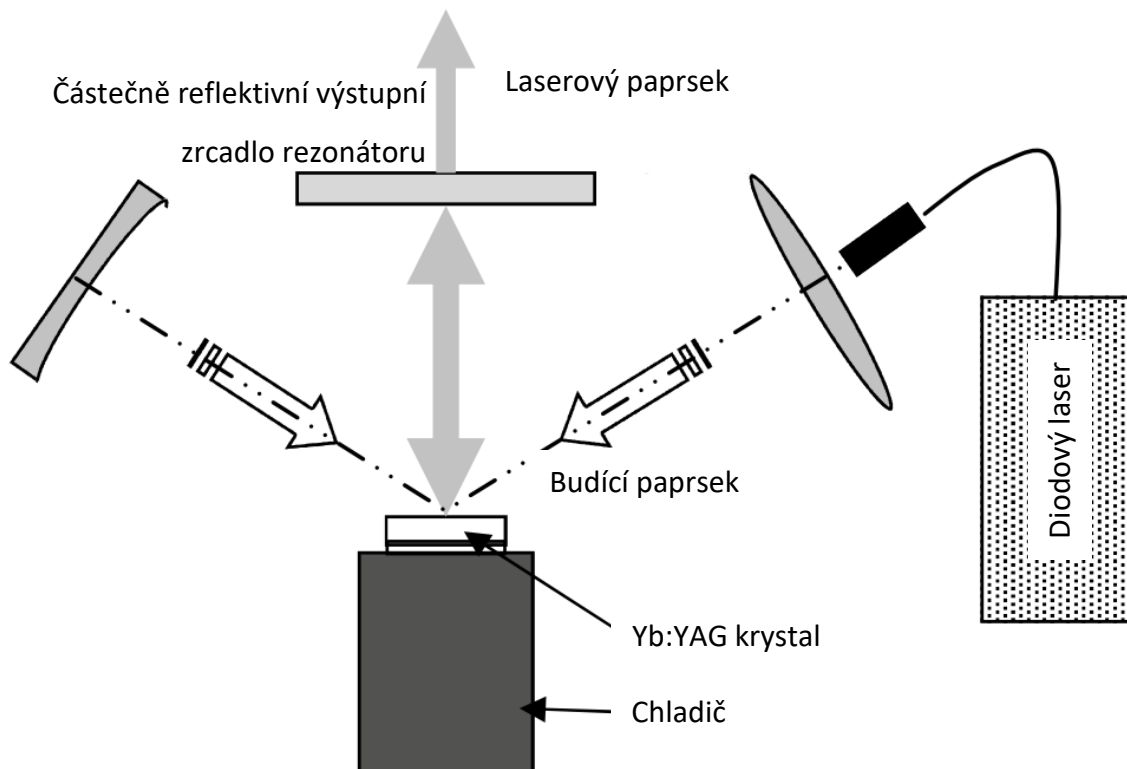
Výhodou diodových laserů je jejich malý rozměr, rychlá odezva a vysoká životnost. Nevýhodami diodových laserů jsou citlivost na kvalitu chlazení, velikost procházejícího proudu a poměrně vysoká divergence paprsku (30 až 40 °). Hlavní uplatnění nalézají diodové lasery v podobě buzení jiných typů pevnolátkových laserů. [22; 30; 32]

6.3.6. Diskové lasery

Druh laserového zdroje vyráběný výhradně německou firmou Trumpf s označením TruDisk. Vlnová délka paprsku je 1 030 nm je produkována aktivním prostředím tvaru disku, který je obvykle dopován neodymem, případně ytterbiem. Buzení je obvykle zajištěno světelnými diodami nebo vláknovým laserem. Výkon diskového laseru je díky diskovému tvaru aktivního prostředí nadstandardně odolný vůči kolísání teploty

chladicího média. Výkonové stability je dosaženo vysokou účinností chlazení zajištěnou vhodným tvarem aktivního prostředí. Diskové lasery jsou zdrojem paprsku o vysoké kvalitě (malé divergenci). Hranice maximálního výkonu diskového laseru nebyla doposud nalezena, aktuálně nejsilnější zdroj dosahuje výkonu 16 kW.

Z důvodu vysoké kvality paprsku, robustnosti konstrukce a možnosti použití modifikovaných typů spotů paprsku byl za účelem vývoje probíhajícího u komerčního partnera této diplomové práce vybrán právě diskový laser. [22; 27; 30]



Obrázek 22: Schéma konstrukce diskového laseru [30]

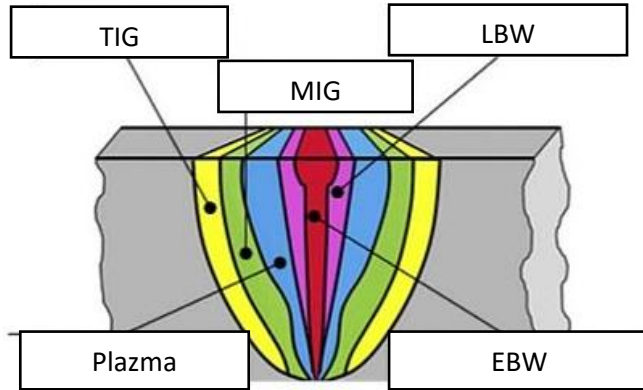
6.4. Srovnání laserového svařování s ostatními technologiemi

Laserové svařování je vyspělá výrobní technologie vhodná pro náročné aplikace a aplikace s velkými výrobními dávkami. Pokud bychom měli rozdělit metody svařování na dvě základní kategorie, tak můžeme uvažovat toto rozdělení:

- Konvenční technologie svařování – MIG, MAG, TIG, MMA, odporové svařování
- High tech technologie svařování – laserové svařování (LBW), svařování elektronovým svazkem (EBW)

Největší rozdíl je samozřejmě mezi kategorií konvenčních a high tech svařovacích technologií. Rozdíl je nejen ve složitosti svařovacích zdrojů, ale také velikosti svaru a jejich TOO. Obecně lze konstatovat, že technologie konvenčního svařování jsou jednodušší

a konstrukčně starší zařízení. Tyto technologie jsou vhodné pro aplikace s nižšími nároky a menší výrobní množství. Konvenční technologie jsou také charakteristické větší šířkou svaru a TOO. Naopak high tech technologie (LBW, EBW) disponují technologicky složitou konstrukcí způsobující vysoké investiční náklady. Výhodami těchto technologií jsou



Obrázek 23: Porovnání velikosti TOO dle svařovací technologie [33]

minimální velikost svaru i TOO. [33]

High tech technologie jsou proto používány tam, kde je to z pohledu charakteristiky svarového spoje nutné. S ohledem na povahu procesu se jedná zejména o automatizovanou sériovou výrobu mnohdy kombinovanou

s automatizovanou kontrolou kvality svarového spoje. High tech aplikacím aktuálně dominuje LBW. EBM je značně omezeno potřebou svařování ve vakuu, které redukuje paletu možných aplikací. Začátek výraznějšího rozvoje průmyslových aplikací LBW můžeme datovat do 90. let 20. století. Svůj podíl na rostoucím množství aplikací má také klesající cena technologie.

7. DRUHY SVARŮ

7.1. Bodové svary

Svarové spoje minimální délky, jejichž výroba často probíhá bez vzájemného posuvu svařovacího zařízení a svařence. Velikost svaru je dána procesními parametry. Bodové svary jsou masově rozšířenou variantou svarů používaných zejména v oblasti svařování tenkých plechů, např. karoserií automobilů. Definice bodového svaru není omezena výrobní technologií, lze ale říct, že značnou část výroby bodových svarů zastřešuje odporové svařování.

Mezi výhody bodových svarů patří nižší výrobní čas a s tím spojené finanční náklady, minimalizace deformací svařenců díky redukovanému množství vneseného tepla. Nevýhodou je snížený nosný průřez svaru, netěsnost spoje a ztížená kontrola kvality svaru některými technologiemi (např. vířivými proudy).

7.2. Kontinuální svary

Pojmem kontinuální svar označujeme svarové spoje, jejichž délka násobně přesahuje jejich šířku, tzn. nepřerušovaný svar je vyhotoven za vzájemného pohybu svařovacího zařízení a svařence. V závislosti na dané aplikaci je posuv zajištěn ze strany svařovacího zařízení nebo svařence, v případě válcovacích linek je svařovací zařízení statické a svařovaný profil je posouván válcovacími nástroji. Drtivá většina svařovaných válcovaných profilů spadá právě do kategorie kontinuálních svarů, někdy také označovaných jako svarů nekonečných. Výhody a nevýhody kontinuálních svarů jsou ve své podstatě opačné svarům bodovým, a tedy velký nosný průřez, v případě kvalitního vyhotovení těsnost spoje a vhodnost pro veškeré metody kontroly kvality. Mezi nevýhody patří vyšší množství vneseného tepla a s tím související riziko deformací, vyšší časová i finanční náročnost.

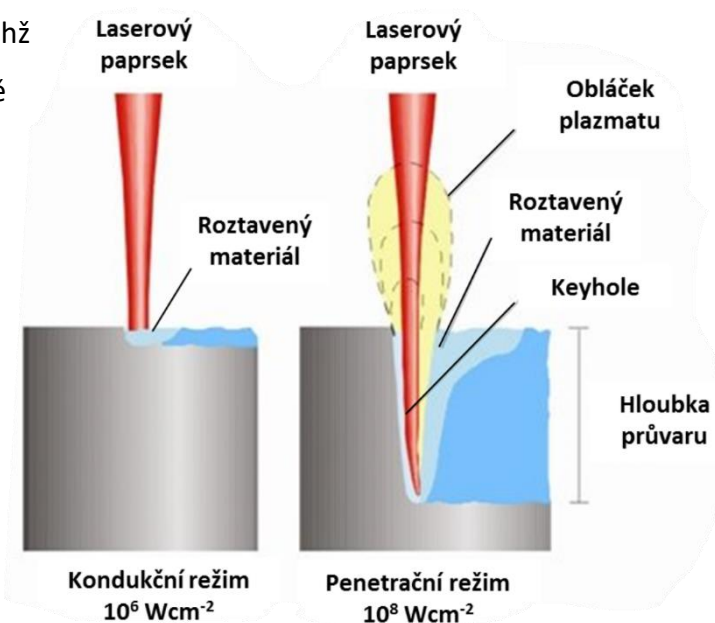
7.3. Kondukční svary

Svary, jejichž šířka přesahuje hloubku průvaru. Jsou vhodné pro svařování tenkých materiálů, obvykle do tloušťky cca 1 mm. Teplo se do svařence dostává kondukcí, která omezuje maximální hloubku průvaru. Střední část svarové lázně je ohřívána laserovým paprskem a krajní část je tavena vedeným teplem ze středu svaru, zbývající teplo přechází do TOO. V případě, kdy již není dostatečně intenzivní odvod tepla, stoupá teplota svarové lázně až na teplotu odpařování čímž přechází svar do keyhole režimu. TOO je větší než u keyhole režimu.

Kondukční svary se mohou vyskytovat v podobě bodových i kontinuálních svarů. [34; 35]

7.4. Keyhole svary

Označení pro hluboké svary, jejichž hloubka průvaru až 10-ti násobně přesahuje šířku svaru. Název vychází z tvaru otvoru při svařovacím procesu – v českém znění tzv. svařování klíčovou dírkou. Podmínkou metody je vysoká výkonová hustota paprsku dostupná u LBW a EBW (min $10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$). Svařovaný materiál je ohříván natolik, že je nejen taven, ale zároveň



Obrázek 24: Porovnání kondukčního (vlevo) a keyhole (vpravo) svařování [36]

dochází k jeho odpařování čímž vzniká paroplynový kanál vytlačující taveninu na povrch svaru. Vzniklý paroplynový kanál umožňuje průchod paprsku pod povrch svařovaného materiálu zajišťující vyhotovení hlubokých svarů jedním průchodem (někdy též nazýváno svařování průchozím paprskem). Vzniklá dutina zvyšuje absorbivitu laserového záření, a tedy i účinnost procesu svařování. Dutina se uzavírá vzájemným pohybem paprsku a svařence, působením vlivu povrchového napětí. Metoda je charakteristická minimální velikostí TOO, minimálními deformacemi svařenců a vysokou svařovací rychlostí. Obvykle je keyhole svařování prováděno bez přídavného materiálu. Keyhole svařování je používáno majoritně u ocelí, při svařování plastů dochází k nestabilitě „klíčové dírky“.

[22; 23; 36]

8. VADY SVARŮ

Svary jsou z pohledu kvality konstrukce a jejich případných vad považovány za kritické a vždy se na ně soustřeďuje velká pozornost. Sebelepší svar vykazuje jistou odlišnost od základního materiálu, ostatně proto i norma ČSN EN ISO 13919-1 [37] – *Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Požadavky a doporučení pro určování stupňů jakosti* - označuje nejvyšší kvalitu svaru písmenem B reprezentující předpoklad přítomnosti vad. Vady svaru vznikají při všech metodách svařování, pouze se liší jejich četnost a charakter. Vady svaru negativně ovlivňují mechanické a chemické vlastnosti svaru, a to zejména jeho pevnost,

tažnost, a korozivzdornost. Požadovaná kvalita svaru je stanovena dle nároků kladených na svarový spoj, rostoucí požadavky na kvalitu provedení zvyšují časovou i finanční náročnost provedení svaru.

Kvalitou svaru se zabírají normy ČSN EN ISO 6520 [38] – *Klasifikace geometrických vad kovových materiálů* a specializovaná norma pro laserové a elektronové svařování ČSN EN ISO 13919-1. Norma ČSN EN ISO 6520 definuje podobu jednotlivých vad a jejich značení (klasifikaci), zatímco norma ČSN EN ISO 13919-1 stanovuje mezní hodnoty vad (velikost, četnost) s ohledem na charakter LBW a EBW (štíhlost svaru). Norma ČSN EN ISO 5817 [39] - *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů jakosti* používaná pro hodnocení svarů konvenčních svařovacích technologií nelze použít z důvodu odlišného součinitele tvaru svaru.

V případě dodávek svařenců vysoké kvality bývá povinné provádění 100% kontroly kvality, může se jednat o kontrolu metodami VT, PT, MT nebo UT, RT, kontroly vířivými proudy atp.

Tabulka 6: Klasifikace jakosti svaru dle EN ISO 13191-1 [37]

| Mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti | | |
|--------------------------------------|---|---|
| D | C | B |

Dále následuje popis nejčastějších typů vad, které jsou definovány normou ČSN EN ISO 6520-1.

8.1. Trhliny – skupina č. 1

Trhliny svaru dělíme na: [38; 40; 41]

Podle teploty vzniku:

8.1.1. Horké trhliny (Ea)

Vznikají při teplotách nad 650 °C, jsou důsledkem vysokého obsahu C, Mn, a především přítomností S a P a dalších legur oceli ve zvýšeném množství (Si).

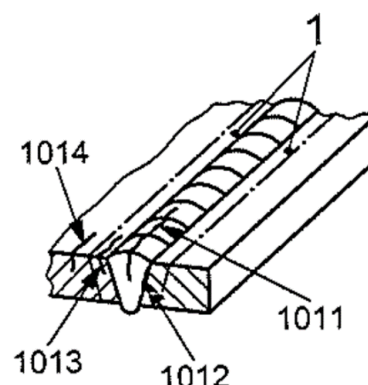
8.1.2. Studené trhliny (Ef)

Vznikají při teplotách pod 200 až 300 °C, jsou důsledkem přítomnosti H. Obvykle se tvoří po zakončení svařování.

Podle geometrie vady:

8.1.3. Podélná trhlina (EN ISO 6520 – vada č. 101)

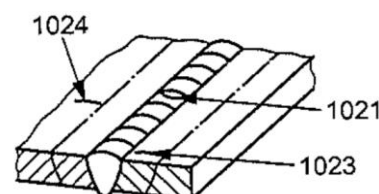
Rovnoběžná trhlina s osou svaru, která se může vyskytovat ve svarovém kovu (č. 1011), jeho hranici se základním materiálem (č. 1012), v TOO (č. 1013) nebo také v základním materiálu (č. 1014). [38]



Obrázek 25: Schéma svaru s podélnou trhlinou (101) [38]

8.1.4. Příčná trhlina (102)

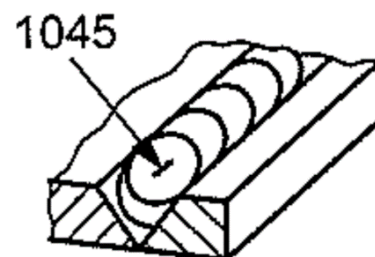
Trhlina jdoucí kolmo vůči ose svaru. Může se vyskytovat ve svarovém kovu (č. 1021), v TOO (č. 1023) nebo v základním materiálu (č. 1024). [38]



Obrázek 26: Schéma svaru s příčnou trhlinou (102) [38]

8.1.5. Kráterová trhlina (104)

Vznikají při náhlém ukončení svařování. Jsou důsledkem smršťování svaru při jeho tuhnutí. Dle směru trhliny jsou přesněji určeny na podélné (č. 1045), příčné (č.1046) a hvězdicové (č. 1047). [38]



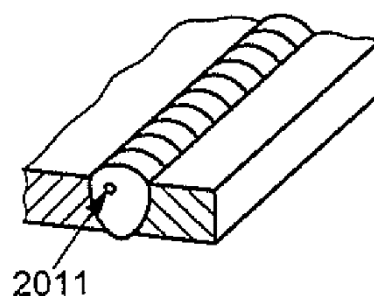
Obrázek 27: Schéma svaru s kráterovou trhlinou (1045) [38]

Na rozdíl od ostatních vad svarů zmíněných v této kapitole (8.1 až 8.6) jsou trhliny typické svým postupným zvětšováním při namáhání svarového spoje mechanickým napětím. S rostoucí velikostí trhlín roste riziko selhání konstrukce.

8.2. Dutiny – skupina č. 2

8.2.1. Pór (2011)

Póry označují objemové vady protáhlého či kulovitého tvaru, které jsou vyplněné plynem. Příčinou vzniku jsou nečistoty na svarových hranách ve formě plynů jako např. O, N, H, další možné příčiny jsou nadměrná rychlost svařování vedoucí k vysoké rychlosti tuhnutí lázně, dlouhý oblouk nebo vlhkost ochranné atmosféry. [40; 41]



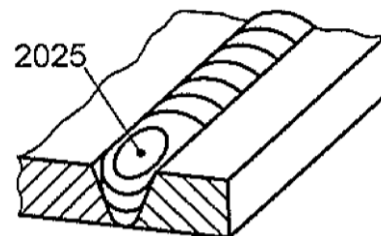
Obrázek 28: Schéma svaru s pórem (2011) [38]

Detailnější rozdělení dle číslice na 4. pozici referenčního čísla se obvykle vztahuje k množství a rozmístění plynové dutiny (póru) – rovnoměrné (č. 2012), shluky (č. 2013), řádek póru (č. 2014) a povrchové póry (č. 2017). [38]

8.2.2. Staženina (202)

Druh dutiny způsobený smrštěním v průběhu tuhnutí svarové lázně. Přesnější označení je dáno velikostí a charakterem vady – kráterová staženina (č. 2024), koncová kráterová (č. 2025) a mikrostaženina (č. 203).

[38]



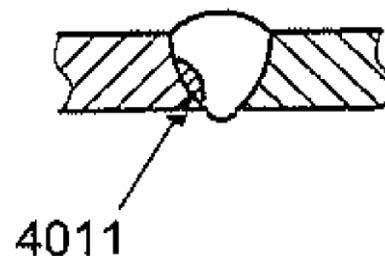
Obrázek 29: Schéma svaru se staženinou (202) [38]

8.3. Studené spoje a neprůvary – skupina č. 4

Studený spoj označuje stav, při kterém se nedokonale spojí svarový kov se základním materiálem. Důvodem je nízký svařovací výkon, nevhodný průměr obalené elektrody nebo její špatné vedení (platí pro obloukové svařování), vysoká rychlost svařování. [38; 40]

8.3.1. Studený spoj (401)

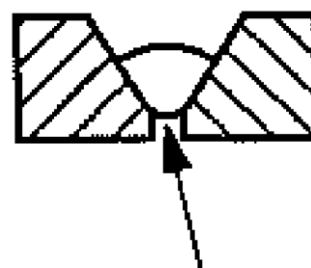
Vada nedostatečného spoje svaru a základního materiálu, případně nedostatečné spojení jednotlivých vrstev svaru mezi sebou. Studený spoj je vadou snižující únosnost svaru i přes zdánlivě dostatečný nosný průřez svaru. Dle charakteru vady určujeme přesnější označení – studený spoj svaru a základního materiálu (č. 4011), studený spoj mezi svarovými housenkami (č. 4012) nebo studený spoj v kořeni (č. 4013). [38]



Obrázek 30: Schéma svaru se studeným spojem (4011) [38]

8.3.2. Neprůvar (402)

Vada nedostatečné velikosti svaru v porovnání s jeho předepsanou velikostí. Obvykle se vyskytuje v podobě neprovařeného kořene (č. 4021). Nedostatečný průvar základního materiálu je obvykle způsoben nedostatečným svařovacím výkonem, případně pohlcením části energie svařovacího paprsku plazmou svařovacího procesu



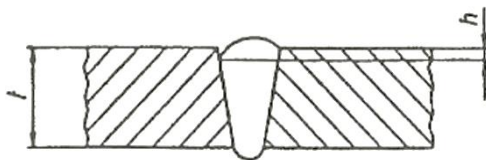
Obrázek 31: Schéma svaru s neprovařeného kořene (4021) [38]

indukovanou svařovacím procesem. Paprsek nemá dostatek energie pro natavení materiálu v potřebné tloušťce. Neprůvar nejenže snižuje nosnou plochu svaru, způsobuje ale také koncentraci napětí, zvyšující riziko poškození svarového spoje při zatížení. V případě nemožnosti zvýšení svařovacího výkonu musí být snížena rychlost svařování (posuv). [38]

8.4. Vady tvaru a rozměru – skupina č. 5

V případě této diplomové práce se jedná o majoritně zastoupené typy vad pozorované na vyhodnocovaných vzorcích.

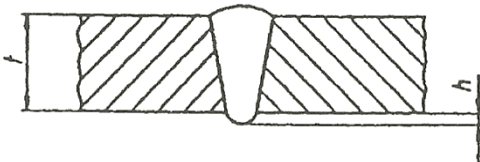
8.4.1. Zápal (501)



Obrázek 32: Schéma svaru se zápalem (501) [42]

Špatné napojení svaru a základního materiálu, okraj svaru je vůči základnímu materiálu propadnutý (vytváří vrub). Zápal způsobuje snížení nosného průřezu svaru a koncentraci napětí ve špičce zápalu. V případě nepravidelného vrubu na přechodu svaru a základního materiálu se jedná o zápal (č. 501), v případě souvislého zápalu značné délky bez přerušení se jedná o souvislý zápal (č. 5011). Příčinou je nadměrný svařovací výkon, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody či špatné vedení elektrody. [37; 42]

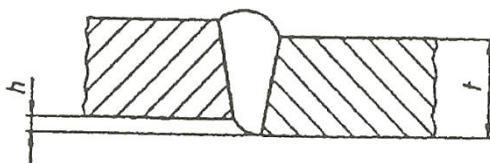
8.4.2. Nadměrný průvar (504)



Obrázek 33: Schéma svaru s nadměrně propadlým kořenem (504) [42]

Nadměrné převýšení kořene je opakem vady neprůvaru (402), svařovací výkon je příliš velký a způsobuje propad svarové lázně. Obvykle se jedná o propad svisle dolů ve směru gravitace, může být, ale podpořen proudem ochranné atmosféry kolem laserového paprsku. Obvykle dostačuje snížit svařovací výkon. [37; 42]

8.4.3. Lineární přesazení (507)

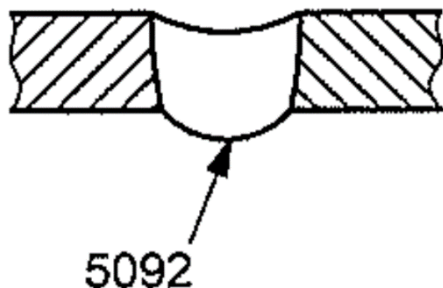


Obrázek 34: Schéma svaru s lineárním přesazením (507) [42]

Lineární přesazení svaru je způsobené špatným navedením svařovaných hran základního materiálu. Může být způsobeno a) špatným navedením materiálu b) tepelnou dilatací materiálu z důvodu vneseného tepla

svařováním. Obvykle lze řešit preciznějším sesazením svařovaných dílů, případně jejich lepší fixací v průběhu svařovacího procesu.[37; 42]

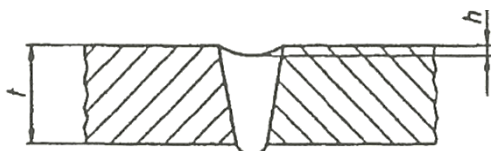
8.4.4. Proláklina (509)



Obrázek 35: Schéma svaru s proláklinou (5092) [37]

Propadnutí svarového kovu vůči základnímu materiálu, obvykle způsobeno působením zemské přitažlivosti při nadměrné velikosti svaru (svařovacího výkonu). V případě prolákliny ve vodorovné poloze je označení upřesněno na 5092. [37; 42]

8.4.5. Neúplné vyplnění svaru (511)



Obrázek 36: Schéma svaru s prohloubeným povrchem (511) [42]

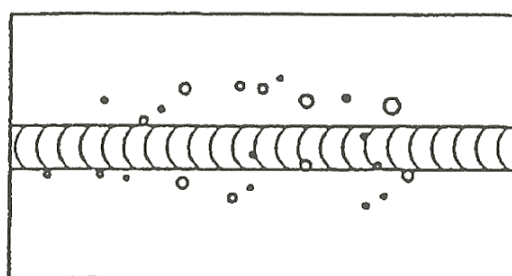
Defekt neúplného vyplnění svaru je obvyklým jevem při svařování bez přídavného materiálu.

Mezi nejčastější příčiny tohoto defektu řadíme

- a) rozstřík materiálu mimo svarovou lázeň
- b) působení gravitace a celkový pokles svaru, často spojený s vadou nadměrně propadlého kořene
- c) odpařením části svarové lázně. [37; 42]

8.5. Různé vady – skupina č.6

8.5.1. Rozstřík (602)



Obrázek 37: Schéma svaru s rozstříkem (602) [42]

Povrchový defekt svaru a jeho okolí, částičky svarové lázně jsou rozstříknuty ze svarové lázně. Zvyšuje drsnost povrchu, částice mohou a nemusejí být pevně spojeny se základním materiálem. Velká míra rozstříku vede k prohloubení povrchu svaru

z důvodu lokálního nedostatku materiálu. Častou příčinou je nadměrná rychlost svařování související s rychlou změnou teplot. Vhodným řešením může být rozostření laserového paprsku, využití ARM metody nebo snížení svařovací rychlosti. [37; 42]

8.5.2. Náběhové zbarvení (610)

Viditelná lehká oxidace povrchu v oblasti svaru, může se vyskytovat i u korozivzdorných ocelí. V případě výraznějšího zbarvení povrchu svaru a TOO se jedná o vadu

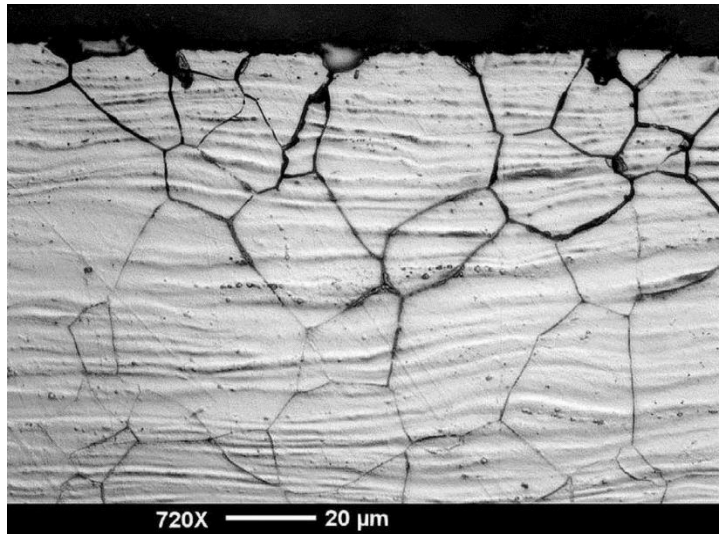
Změna barvy (č. 6101). Obě varianty jsou obvykle způsobeny nedostatečnou ochrannou svaru před působením atmosféry. [37]

8.5.3. Okujený povrch (613)

Vada silné oxidace povrchu svaru. Obvyklou příčinou je nedostatečná ochrana svaru před působením atmosféry. Vada může souviset s dalšími vnitřními vadami svaru způsobenými znečištěním taveniny svaru. [37]

8.6. Mezikrystalická koroze

Druh koroze způsobený lokálním ochuzením o chrom zajišťující korozivzdornost oceli. K ochuzení dochází na hranici zrn, kde je způsobeno precipitací karbidu chromu Cr_{23}C_6 . Precipitace probíhá z důvodu klesající rozpustnosti chromu v závislosti na teplotě.



Mezikrystalická koroze (MKK) *Obrázek 38: Metalografický výbrus MKK [8]*

způsobuje ztrátu soudržnosti zrn a celkové pevnosti materiálu. Ve spojení se špatnou vizuální odhalitelností je MKK poměrně rizikovou vadou. [43]

MKK se lze bránit několika způsoby:[8]

a) Legováním

Přidání tzv. stabilizačních prvků Ti, Nb, Ta, které mají větší afinitu k uhlíku než Cr, čímž přednostně vytvářejí karbidy (TiC , NbC , TaC) a nedochází tak k precipitaci chromu. Pro dostatečnou stabilizaci je nutné dodržení potřebných koncentrací stabilizačních prvků

$$\frac{\text{Nb}}{\text{C}} \geq 8; \frac{\text{Ti}}{\text{C}} \geq 4; \frac{\text{Ta}}{\text{C}} \geq 16; \frac{\text{Ta}+\text{Nb}}{\text{C}} \geq 8$$

b) Snížení obsahu uhlíku

Radikální snížení obsahu C v materiálu pod hodnotu 0,02 % C, případně do 0,05 % C pro svary s rychlými teplotními cykly.

c) Rychlé ochlazení

MKK je způsobena krátkodobým setrváním v kritické oblasti teplot (cca 650 °C), v případě rychlého ochlazení z teploty nad 750 °C lze ocel zachovat v austenitickém stavu.

Pro odstranění precipitovaných karbidů chromu lze zařadit žhání nad teplotami 1 000 až 1 050 °C.

9. TESTOVÁNÍ SVARŮ

Svary jsou zatíženy širokou řadou vad, které se mohou vyskytovat ve vysoké četnosti, proto jsou svary podrobovány řadě testů kvality. Testy nespočívají pouze ve vyhodnocení přítomnosti vad, ale také vyhodnocení jejich četnosti a zejména velikosti, jelikož některé vady jsou do jisté míry výskytu povoleny (tzv. přípustné vady). Vyhodnocení může a nemusí být prováděno v souladu s normou, vždy záleží na požadavku zákazníka, případně nadřazeného legislativního předpisu. Legislativní požadavky můžeme očekávat zejména v případech souvisejících s ohrožením života a zdraví osob.

Testování svarů dělíme do dvou základních kategorií destruktivního a nedestruktivního testování (NDT). Cílem destruktivních zkoušek je zjištění mechanických vlastností svarového spoje, zatímco cílem NDT je kontrola celistvosti svarových spojů (hledáme vady nebo indikace vad uvedených v ČSN EN ISO 6520-1). Základní druhy zkoušek obou zmíněných kategorií jsou popsány v následujících podkapitolách.

9.1. Nedestruktivní testování

Nedestruktivní metody testování svarů jsou metody, při kterých nedochází k destrukci testovaného dílu. Jejich velkou výhodou je možnost provádění 100% kontroly i možnost jejího opakování. Můžeme se také setkat s označením NDT, tedy anglickou zkratkou pro „Nondescrutive testing“. Existuje hned několik metod NDT, z nichž má každá svá specifika.

9.1.1. Vizuální kontrola

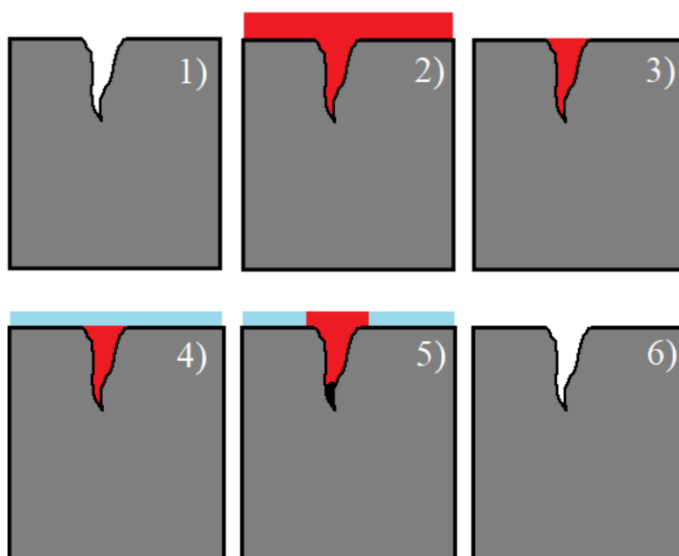
Nejjednodušší zkouška NDT testování pro odhalení povrchových vad. Ohledání probíhá buď bez zvětšovací pomůcky nebo za jejich použití (lupa), může být použito umělé osvětlení a zároveň doplňkové osvětlení pro zvýšení kontrastu a plastické rozlišitelnosti. Evropskou normou předepisující podobu zkoušky je ČSN EN ISO 17637 (*Nedestruktivní zkoušení – Vizuální kontrola tavných svarů*) [44], další normou věnující

se vizuální kontrole je ČSN EN 13018 (*Nedestruktivní zkoušení - Vizuální kontrola - Všeobecné zásady*) [45]. Norma ČSN EN 13018 definuje přímou a nepřímou vizuální kontrolu. Přímá metoda označuje „*Vizuální zkoušení, při kterém není přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a zkoušenou oblastí*“. Nepřímá metoda označuje „*Vizuální zkoušení, při kterém je přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a zkoušenou oblastí; nepřímé vizuální zkoušení zahrnuje používání fotografie, video techniky, automatizovaných systémů a robotů*“. Často jsou pomůckou pro vyhodnocení referenční kusy reprezentující shodný, či neshodný kus. [46]

9.1.2. Kapilární zkouška

Nedestruktivní metoda testování povrchových vad neporézních materiálů. Na čistý a suchý povrch je aplikována detekční kapalina (penetrant) schopná vniknout do rozevřených povrchových vad. Penetrant je obvykle zbarvená nebo fluorescenční kapalina. Přebytečný penetrant je po technologické přestávce odstraněn z povrchu dílu takovým způsobem, aby nedošlo k jeho odstranění z povrchových vad. Následně je na povrch aplikována vývojka, ta působí na penetrant, který kapilárním účinkem vyvzlíná z vad, čímž zvýrazní

místo vady. Vývojka může mít podobu kapaliny, prášku nebo aerosolového spreje. Dalším krokem je ohledání testovaného místa a vyhodnocení nalezených indikací. K ohledání se používá a) běžné osvětlení b) UV světlo pro fluorescenční penetranty.



Na závěr testu se díl finálně *Obrázek 39: Postup kapilární zkoušky [49]*

očistí o vývojku a zbytky penetrantu. Výhodou metody jsou nízké investiční náklady, jednoduchost a možnost aplikace na velké díly. Problematice penetračních zkoušek se věnuje např. norma ČSN EN ISO 3452 [47] - *Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška* a svarové spoje se vyhodnocují podle normy ČSN EN ISO 23277 [48] - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti*. [49]

9.1.3. Magnetická prášková kontrola

Zkouška feromagnetických materiálů pro odhalení povrchových vad a vad podpovrchových. Během zkoušky je díl zmagnetizován, a to buď přímo (průchodem el. proudu) nebo nepřímo (vnějším zdrojem mag. pole). V místě vady vystupuje magnetické pole nad povrch součásti, kde tvoří tzv. magnetický rozptylový tok. Na místě vstupu a výstupu magnetických siločar vznikají magnetické póly. Odhalení míst vad je provedeno nanesením magnetického prášku či suspenze, který se soustřeďuje v místech rozptylových magnetických toků (tj. ve zmagnetizovaných místech vad). Takto označené indikace vad jsou poté vizuálně vyhodnoceny. Prášek je po provedení zkoušky odstraněn. Vhodné je také testované díly demagnetizovat. Princip zkoušky je předepsán v normě ČSN EN ISO 9934-1 [50] - *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Obecné principy*, stupně přípustnosti vad jsou popsány v normě ČSN EN ISO 23278 [51] - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Stupně přípustnosti*. [52; 53]

9.1.4. Ultrazvuková kontrola

Metoda je založena na průchodu ultrazvukového vlnění testovaným materiálem. Ultrazvukové vlny jsou generovány sondami v rozsahu 1 až 10 MHz, ty jsou směřovány do testované oblasti, vlnění prochází materiálem, v případě nárazu do rozhraní (konec dílu nebo vada) je část vln odražena zpět. Zpětně odražené vlnění je detekováno převodníkem sondy a na základě času a amplitudy vlnění je stanovena pozice a velikost vady. Ultrazvukovým zkouškám je věnována norma ČSN EN ISO 16810 [54] - *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem - Obecné zásady*. Ultrazvukové zkoušky můžeme přesněji rozlišit podle funkce a typu UT sond a to na:

- a) Přímé testování – vysílač i přijímač se nacházejí v jedné sondě
- b) Průchodové testování – vysílač a přijímač jsou na opačné straně dílu
- c) Phased array – sondy jsou instalovány v sestavě a generují impulzy v časovém offsetu, čímž je zvyšována přesnost kontroly. [54; 55]
- d) TOFD – vysílač i přijímač jsou instalovány na totožné straně dílu ve vzájemném rozestupu, využívají lomených vln [54; 55; 56; 57]

9.1.5. Zkouška prozářením

Metoda využívající RTG, gama záření nebo záření radioizotopů k vizualizaci vnitřní struktury dílů a k odhalení případných vad. Generované záření je směřováno na testovaný objekt, kterým částečně prochází a částečně je pohlcováno. Velikost pohlcení závisí na materiálu a jeho tloušťce. Prošlé záření je zachyceno na druhé straně dílu detektorem (digitální detektor nebo fotocitlivý film). Zkoušku prováděnou za pomoci digitálního detektoru označujeme jako radioskopickou, zatímco zkoušku prováděnou za pomoci radiografického filmu označujeme jako radiografickou. Detektor ze zachyceného záření tvoří obraz vnitřní struktury dílu, ten je následně analyzován, analýza může probíhat automatizovaně nebo za pomoci operátora. Nevýhodou metody je vznikající radiace nebezpečná pro obsluhu zařízení. Radiografickým testováním se zabývá norma ČSN EN ISO 17636 [58] - *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení*, první část normy je zaměřena na záření využívající film, zatímco druhá část [59] je zaměřena na zařízení využívající digitální detektory.

9.1.6. Testování vířivými proudy

Zkouška sloužící k odhalení povrchových i podpovrchových vad elektricky vodivých materiálů. Testovací cívkou prochází střídavý proud vytvářející střídavé magnetické pole, které v testovaném dílu indukuje vířivé proudy. Indukované vířivé proudy indukují své vlastní magnetické pole interagující s původním polem cívky. Vady v testovaném dílu ovlivňují tok vířivých proudů, a v důsledku také změnu jejich magnetického pole. Rozdíly v magnetickém poli způsobují změnu impedance testovací cívky vůči stavu bez vad. Změny impedance jsou použity k identifikaci defektů. Nejvyšší hustota vířivých proudů je na povrchu, s rostoucí hloubkou dochází k exponenciálnímu poklesu. Hloubku vniku lze ovlivnit změnou frekvence, s klesající frekvencí roste hloubková hustota vířivých proudů, ale zároveň klesá povrchová citlivost. Testovací cívky jsou součástí testovacích sond, které dělíme na:

- a) Absolutní sondy – Sondy s jedním vinutím, která plní napájecí i měřící funkci.
- b) Diferenční sondy – Sondy s dvojitým vinutím, vyhodnocení je provedeno na základě porovnání signálů z obou vinutí. Vyznačují se vyšší citlivostí.

Testování svarů se věnuje norma ČSN EN ISO 17643 [60] - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkouška svarů vířivými proudy analýzou komplexní roviny*. [61; 62]

9.2. Destruktivní testování

Destruktivní testování je soubor metod kontroly kvality, při kterých dochází k nevratnému poškození testovaných dílů, např. roztržení vzorku pro tahovou zkoušku. S ohledem na destruktivní charakter testů slouží tyto metody k namátkové kontrole kvality. Vyhodnocení je prováděno s ohledem na předpokládanou stabilitu procesu po danou výrobní dávku.

9.2.1. Metalografická zkouška

Při zkoušce je analyzován příčný řez svarovým spojem. Obvykle se jedná o vyseparovaný vzorek z kontrolovaného dílu v takovém rozměru, aby byla možná manipulace pod mikroskopem. Majoritní množství ohledání je prováděno na světelných mikroskopech. Pro kvalitní vyhodnocení reálného stavu je potřebné eliminovat znehodnocení metalografických vzorků, a to zejména z pohledu tepelného ovlivnění v místě řezu a případných deformací či kontaminací přípravného procesu. Řez je vhodné dostatečně chladit a provádět jej s minimální řeznou silou. Oddělené vzorky jsou následně postupně broušeny, v případě detailnějšího zkoumání také leštěny a leptány pro zvýraznění vnitřní struktury. Za účelem automatizace procesu broušení a následného leštění jsou vzorky obvykle zalisovány případně zality do preparační hmoty. Druh leptací látky (kyseliny) závisí na analyzovaném materiálu. Podle zkoumané charakteristiky dělíme metalografické řezy na:

- a) Zkouška makrostruktury – Pozorujeme geometrii svaru a makroskopické vady
- b) Zkouška mikrostruktury – Pozorujeme vnitřní strukturu, tj. velikost a tvar zrn, výskyt a charakter mikroskopických vad. Pro pozorování vnitřní struktury musí předcházet leptání. Leptání může být urychleno průchodem el. proudu (tzv. elektrolytické leptání).

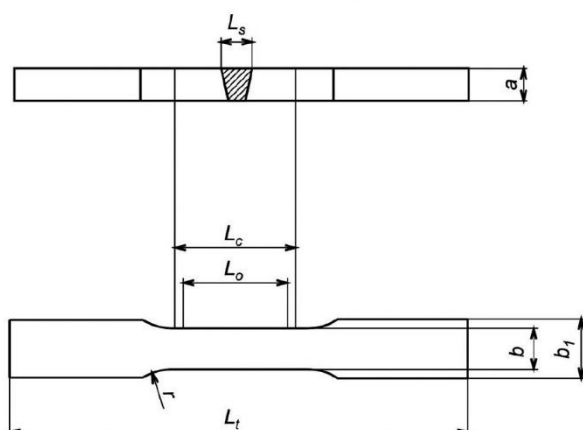
Vyhodnocení metalografických řezů bude jednou z nosných částí vyhodnocení experimentů v rámci této diplomové práce. Makroskopické i mikroskopické kontrole svarů je věnována norma ČSN EN ISO 17639 [63] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Metalografické řezy jsou nejen ověřenou metodou pro kontrolu kvality svarů, ale také nápovědou k příčině vzniku vad, např. viditelné iniciace trhlin, přítomnost nečistot, lineární přesazení hran atd. [64; 65; 66; 67]

9.2.2. Zkouška tahem

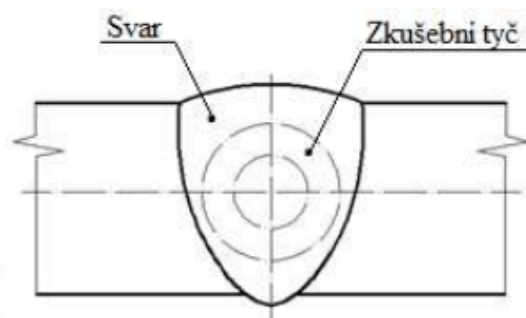
Tahová zkouška svaru je destruktivní zkouška sloužící ke zjištění pevnostních vlastností (meze kluzu, meze pevnosti) a plastických vlastností (tažnosti svarového spoje, kontrakce) svarového spoje. Testovaný vzorek je upevněn do trhacího stroje aplikujícího tahovou sílu narůstající až do doby přetržení vzorku. V průběhu měření je zaznamenávána vzájemná závislost síly a prodloužení. Získané mechanické vlastnosti jsou používány pro odvození souvisejících mechanických vlastností, např. vlastností v tlaku. Tahové zkoušky rozdělujeme dle směru namáhání vůči svaru na:

- Příčná tahová zkouška – Vzorek je dělen příčně vůči ose svaru. Vzorky jsou opracovány tak, aby se osa svaru nacházela ve prostřed testovacího vzorku.
- Podélná tahová zkouška – Zkušební vzorek je dělen podél osy svaru, který se skládá jen ze svarového kovu. Testovací vzorek má obvykle válcový tvar.

Obrázek ploché zkušební tyče



Obrázek 40: Výřez svaru pro příčnou tahovou zkoušku svaru [72]



Obrázek 41: Tvar zkušební tyče pro podélnou tahovou zkoušku svaru [71]

Tahová zkouška bývá prováděna za pokojové teploty, pokud není stanoveno jinak. Podoba tahové zkoušky je předepsána normou ČSN EN ISO 6892 [68] - *Kovové materiály - Zkoušení tahem*, také normou pro příčné tahové zkoušky ČSN EN ISO 4136 [69] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem* a normou pro podélné tahové zkoušky ČSN EN ISO 5178 [70] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. [71; 72]

9.2.3. Zkouška tvrdosti

Jedná se o metodu měření mechanického odporu vůči vniku cizího tělesa (indentoru) do testovaného dílu. Měření můžeme provádět povrchově nebo v příčném řezu. K měření tvrdosti svarových spojů je nejvhodnější metodou zkouška dle Vickerse, která je určena pro měření tvrdých materiálů, a tudíž vhodná pro měření tvrdosti svarů. V případě zkoušení drobných dílů provádíme měření mikrotvrdosti podle Vickerse, princip zkoušky je totožný, pouze je redukována zatěžovací síla a rozteč vtisků. Tvrdost nám poskytuje cenné informace o mechanických vlastnostech v jednotlivých částech svaru, TOO a základním materiálu. Znalost rozdílů nám umožňuje vhodně modifikovat výrobní proces ovlivňující další zpracování, jakým může být např. ohýbání trubek s rizikem vzniku prasklin nadměrně tvrdých svarů a jejich okolí.

Zkouškám tvrdosti resp. mikrotvrdosti svarových spojů jsou věnovány obě části normy ČSN EN ISO 9015 [73; 74] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti*, dále např. norma ČSN EN ISO 6507 [75; 76] - *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse*.

- a) Měření tvrdosti dle Vickerse (HV) – Indentorem je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° a čtvercovou základnou. Tvrdost je vypočítána z průměrné délky úhlopříček vtisku a velikosti zkušebního zatížení. Hodnota za označením HV označuje testovací zatížení v kgf.
- b) Měření mikrotvrdosti dle Vickerse – Zkouška tvrdosti při zatížení menším než 0,2 kgf

Vzorec pro výpočet tvrdosti dle Vickerse [77]:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} \cdot 2 \cdot F \cdot \frac{\sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.1.) [77]$$

9.2.4. Zkouška rázem v ohybu

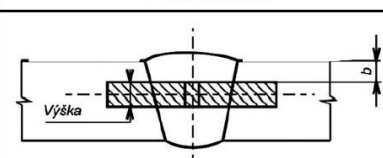
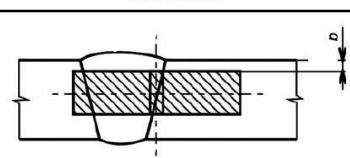
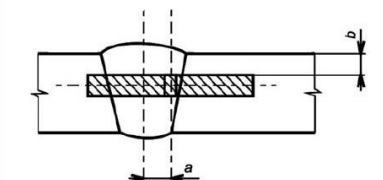
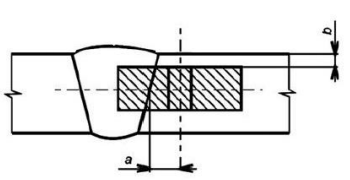
Rázová zkouška v ohybu je dynamická zkouška, při níž zjišťujeme plastické vlastnosti materiálu. Výsledek zkoušky označujeme jako nárazová práce, která slouží k přepočtu na vrubovou houževnatost. Dynamické vlastnosti materiálu jsou silně ovlivněny a) rychlostí deformace b) teplotou.

Z hodnoty vrubové houževnatosti jsme schopni odvodit podmínky iniciace křehkého porušení a související přípustné velikosti vad. Nejrozšířenějším druhem rázové zkoušky je zkouška Charpyho kladivem.

Základem Charpyho zkoušky je přeražení zkušební vzorku kladivem umístěným na kyvadle, práce spotřebovaná k přeražení vzorku je vyhodnocena na základě rozdílu výšky, ze které kladivo padá a výšky, do které se dostane po přeražení vzorku. Zkušební vzorek je ve středu opatřen vrubem tvaru U nebo V, ten způsobuje lokální koncentraci napětí, kterou můžeme přirovnat k trhlině materiálu (svaru). Druhé písmeno označuje umístění vrubu vůči svaru, W pro vrub ve středu svaru, H pro vrub v TOO. Třetí písmeno označuje orientaci vrubu. S pro vrub rovnoběžný s povrchem tyče, T pro vrub kolmý vůči povrchu. Vrub se umísťuje do oblasti zájmu, kterou může být jak základní materiál, TOO tak i svarový kov. Vždy se testují minimálně 3 vzorky.

Úder kladivem je směřován z protější strany vytvořeného vrubu. Se snižující se teplotou klesá rázová houževnatost (nárazová práce), pokles může být prudký nebo pozvolný. Oblast prudkého poklesu označujeme jako tranzitní oblast. Tranzitní teplota je důležitým faktorem při provozu nejen svařovaných konstrukcí ve snížených teplotách.

Charpyho zkoušce je věnována norma ČSN EN ISO 148-1 [78] - *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda* doplněná normou pro svarové spoje ČSN EN ISO 9016 [79] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení.* [72; 80]

| Odkaz | Střed sváru | Odkaz | Linie natave / svaru |
|---------|---|---------|--|
| Značení | Znázornění | Značení | Znázornění |
| VWT 0/b |  | VHT 0/b |  |
| VWT a/b |  | VHT a/b |  |

Obrázek 42: Možné umístění vrubů pro zkoušku rázové houževnatosti svaru [71]

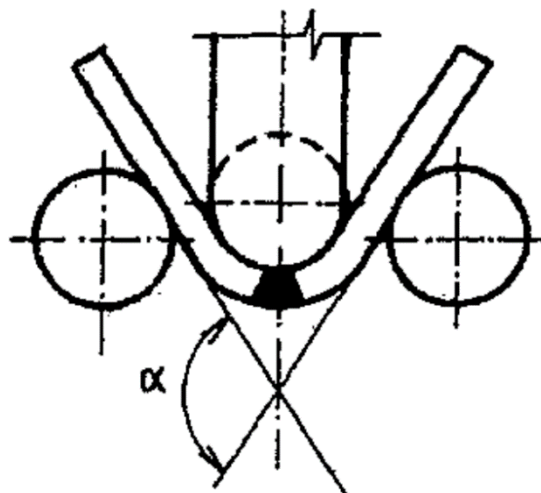
9.2.5. Zkouška ohybem

Někdy také nazývaná starším označením zkouška lámavosti je zkouška vhodná pro ověření plastických vlastností svarového spoje. Povrchové vady a vady blízko povrchu mají na výsledek zkoušky větší vliv než vady vnitřní. Testovací vzorky můžeme namáhat ve třech směrech:

- Tahovým namáháním povrchu svaru
- Tahovým namáháním kořene svaru
- Bočním ohybem – pouze pro svary přesahující tloušťku 12 mm

Zkušební vzorky v podobě tyčí mohou být odebírány

- Příčně – kolmo na osu svaru, svar je umístěn ve středu vzorku
- Podélně – rovnoběžně s osou svaru



Obrázek 43: Příčná zkouška svaru ohybem, povrch svaru namáhán tahem [80]

Trojosý ohyb je prováděn zaobleným trnem s postupně rostoucím zatížením.

Kritériem zkoušky je maximální dosažený úhel bez vzniku trhlin. [72; 80; 81]

Podobu zkoušky předepisuje norma ČSN EN ISO 5173 [82] - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem.*

10. MODIFIKACE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ

10.1. Svařování koaxiálním spotem – metoda ARM

Jednou z možných modifikací laserového svařování je použití koaxiálního spotu, tedy laserového paprsku, který je rozdělen na jádro a vnější kroužek. Cílem rozdělení paprsku je možnost regulace výkonu samostatně v jádře a samostatně ve vnějším kroužku v rozpětí 0 až 100 % výkonu. Účelem tohoto rozdělení je maximalizace průvaru, průvar je majoritně zajištěn jádrem paprsku, zatímco minimalizace rozstříku a dalších povrchových vad je úkolem vnějšího kroužku. [22]

10.1.1. Paprsky stejné vlnové délky

Základní metodou ARM metody je rozdělení paprsku s totožnou vlnovou délkou. Obvykle je problematika kvality povrchu svaru řešena defokusací paprsku, což ale vede

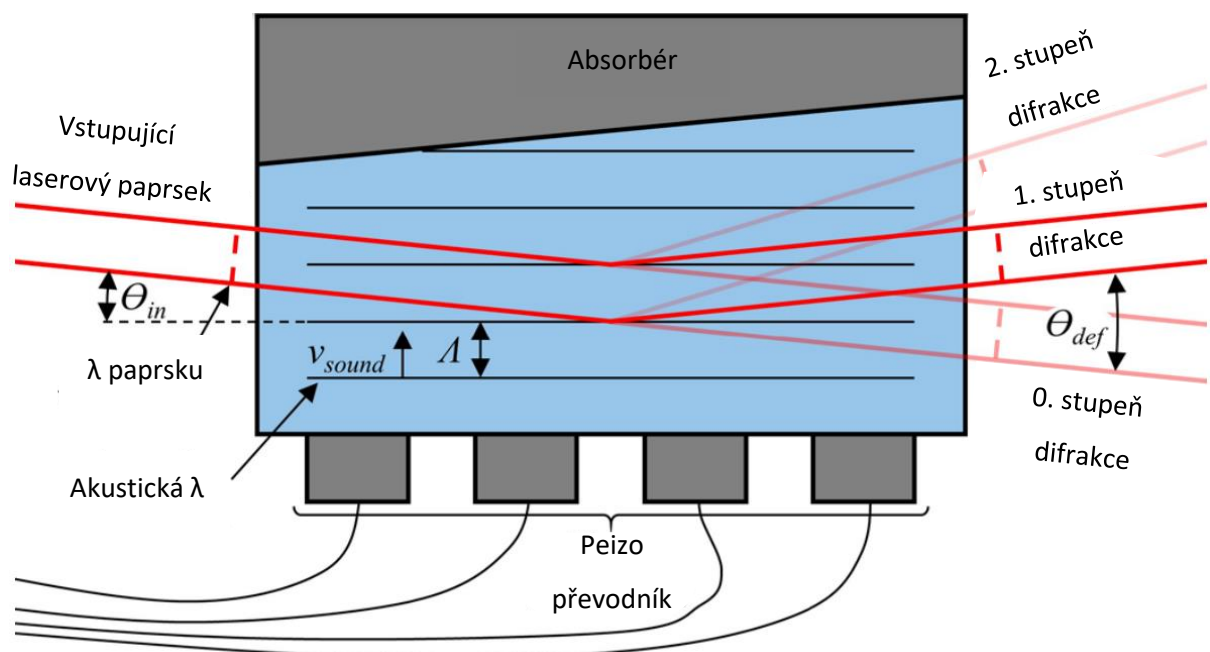
zároveň ke snížení intenzity paprsku v jeho střední části a nutnosti navýšení svařovacího výkonu. Rozdělení paprsku do koaxiálního spotu umožňuje zachování vysoké intenzity energie ve středové oblasti při nižší intenzitě paprsku vnějšího kroužku potřebné pro kvalitní napojení svarové lázně a základního materiálu.

Toto technické řešení je používáno i v aplikacích Trumpf Brightline využitých v této diplomové práci. [22]

10.1.2. Paprsky odlišné vlnové délky

Důležitým faktorem laserového svařování je odrazivost paprsku svařovaným materiálem a jeho povrchem. Odrazivost je silně závislou charakteristikou na vlnové délce dopadajícího záření. Avšak odrazivost základního materiálu je také ovlivněna jeho teplotou, v případě natavení svarové lázně je již výhodné použití paprsku odlišné vlnové délky, a právě proto vznikly aplikace s použitím paprsků odlišných vlnových délek. Vnější kroužek s vlnovou délkou cca 1 μm taví povrch základního materiálu, zatímco jádro s vlnovou délkou cca 0,5 μm slouží ke zvýšení hloubky průvaru. Cílem této technologie je maximalizace účinnosti ohřevu a tavení svařovaného materiálu. [22]

10.2. Svařování tvarovým spotem

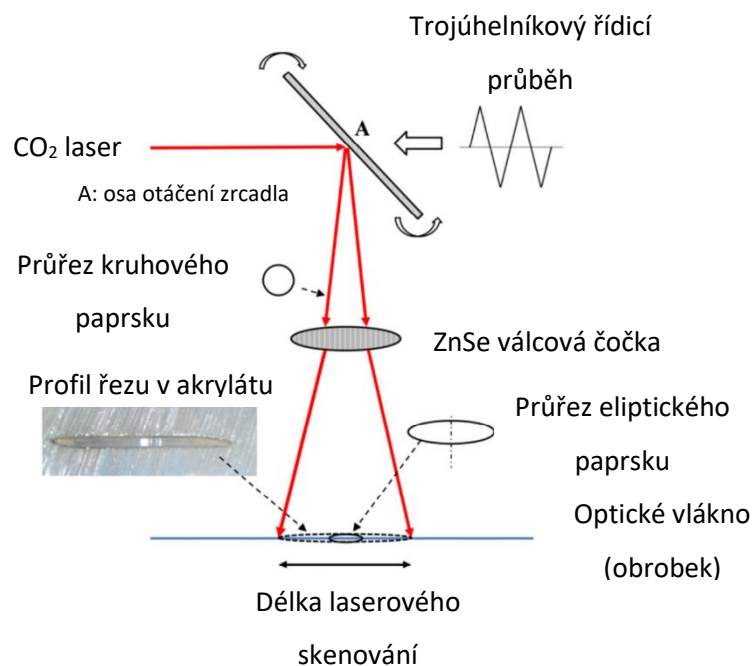


Obrázek 44: Schéma funkce akusticko – optického deflektoru (AOD) [83]

Tvar a rozložení intenzity paprsku v jeho průřezu jsou další možností modifikace svařovacího procesu. Nejčastěji používaný tvar je kruhový spot s Gaussovským rozložením energie paprsku, tj. intenzita paprsku výrazně narůstá směrem ke středu paprsku, to vede k mírnějšímu gradientu teploty v rámci laserového svařování.

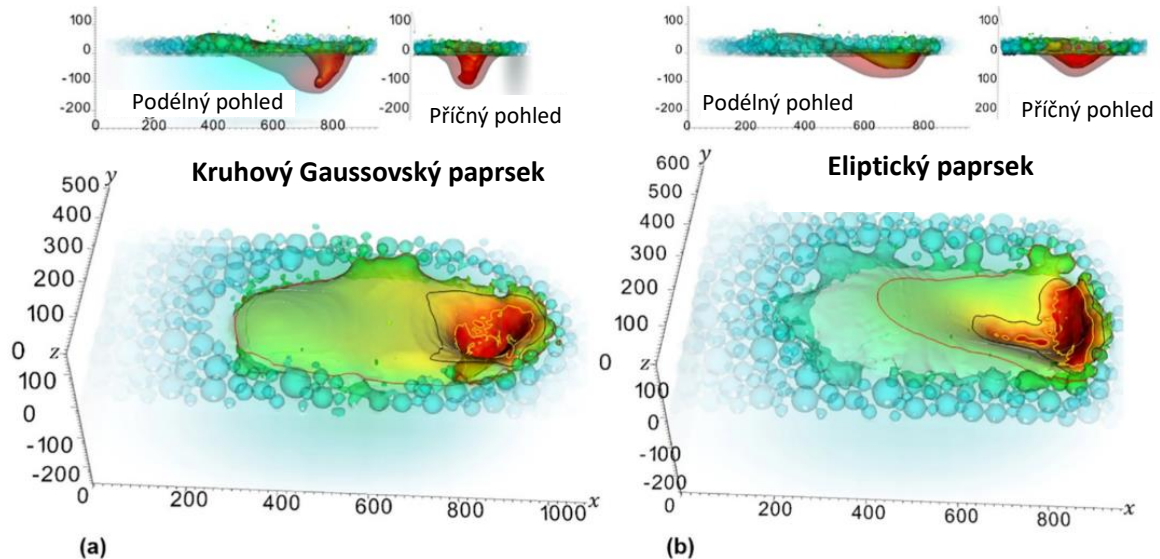
Změnu tvaru i rozložení intenzity paprsku je možné provést použitím patřičné optické soustavy nebo např. akusticko optickým deflektorem (AOD). Jednodušším a v této práci použitým řešením je optická úprava tvaru spotu. Jedná se o metodu vhodnou pro méně náročné modifikace pevných symetrických tvarů. Výhodou je jednoduchost, spolehlivost a vysoká účinnost zařízení. Druhou uvedenou variantou je AOD, ta umožňuje dynamickou změnu spotu a rozložení intenzity paprsku. AOD pracují na principu difrakce pomocí zvukové vlny v optickém krystalu (viz obr. 44). Zvuková vlna působí v důsledku mechanické modulace hustoty jako objemová mřížka. Úhel vychýlení může být upraven změnou frekvence zvukových vln. Tvorba složitějších tvarů může být zajištěna překrytím několika frekvencí.

Eliptický spot je jednou z častých variant tvarových spotů, jeho použití vede ke změně tepelného gradientu způsobujícího změnu orientace zrn, výrazné redukci jejich velikosti (až 50 %) a tím i celkovému zlepšení mechanických vlastností svarů a TOO. Eliptický spot vede také k minimalizaci vzniku textury, rychlejší nukleaci a vzniku vyššího podílu



Obrázek 45: Optická sestava k tvorbě eliptického spotu (laserové skenování) [29]

rovnosých zrn. V porovnání s Gaussovským rozdělením kruhového spotu dosahuje eliptický spot při totožném výkonu nižší hloubky průvaru, viz obr. 46. Póry svaru jsou nejčastěji situovány na jeho okrajích. [29; 83; 84]



Obrázek 46: ALE3D simulace jednotlivých stop vytvořených pomocí kruhového a eliptického spotu [84]

Obrázek č. 46 ukazuje grafický výsledek simulace svařování kruhovým Gaussovským a eliptickým paprskem. Použitý svařovací výkon je 150 W při rychlosti $9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Azurová barva odpovídá pokojové teplotě, červená 3 200 K, žlutá 3 000 K, černá 2 500 K, světle červená 1 700 K. Z obrázku je patrný rozdíl tvaru svarové lázně, kdy eliptický paprsek proniká do menší hloubky, ale do větší šířky základního materiálu, což může být vhodnou variantou pro svařování tenkých plechů při zajištění dostatečné šířky svaru při minimalizovaném množství vneseného tepla díky kratší stopě laserového paprsku (osa X).

11. ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je ověření vlivu instalace eliptického ARM spotu namísto kruhového ARM spotu. Svařovací laser je instalován do válcovací linky určené k výrobě kruhových trubek o průměru 22 mm a tloušťce stěny 0,6 mm. Hlavní sekce linky ve směru toku materiálu jsou: odvíječ svitku, formovací sekce, svařovací sekce, kalibrační sekce, letmé dělení.

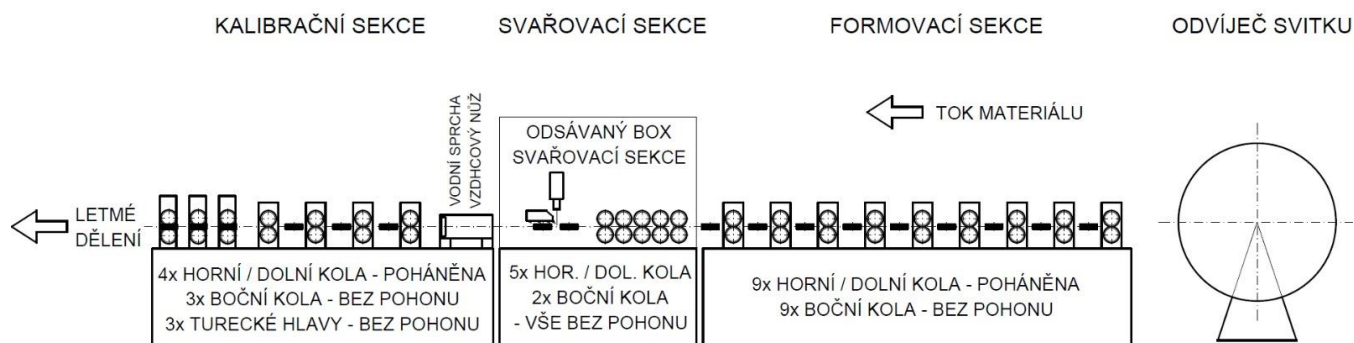
Základní materiál je dodáván v podobě svitku a jeho plynulá dodávka do výrobní linky je regulována odvíječem svitku, ve formovací sekci linky je vyválcován kruhový průřez trubky, v následující svařovací sekci je profil formován minimálně, hlavním cílem nástrojů ve svařovací sekci je precizní vedení profilu s důrazem na stabilní vedení svarové spáry. Svařený profil je po výstupu ze svařovací sekce chlazen vodní sprchou, ulpělá voda na povrchu trubky

je odstraňována vzduchovým nožem. Vzduchový nůž strhává vodu z povrchu trubky po celém jejím obvodu silným proudem stlačeného vzduchu. Následující kalibrační sekce redukuje průměr trubky rovnoměrně v celém průřezu. Úprava svaru v podobě jeho zaválcování nebo leštění není instalována. Kontrola kvality svaru není prováděna, je ale prováděna online 100 % kontrola pozice hran pásky před místem svařování pro případné zastavení válcovací linky v okamžiku, kdy dojde k nadměrnému lineárnímu přesazení hran, překročení požadované šířky spáry nebo odchylky její pozice. Kontrola je prováděna 2D skenerem Keyence z řady LJ-X. Instalovaný systém slouží jako prevence vzniku neshodného svaru z důvodu špatného formování a vedení profilu, které jsou nejčastějšími příčinami vzniku vad svaru v testovaném zařízení.

12. EXPERIMENT

12.1. Výrobní zařízení

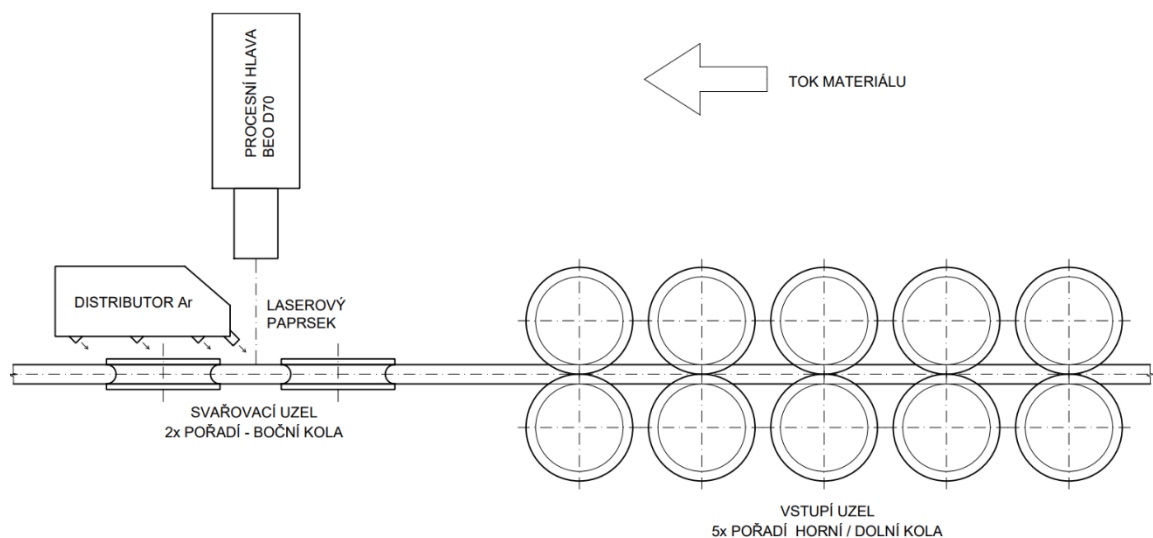
Veškeré svařovací testy byly provedeny na válcovací lince jejíž nominální rychlost je $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Pohon nástrojů je rozdělen na dvě části, každá část je poháněna jedním motorem, jehož síla je do jednotlivých průchodů rozvedena rozvodovou skříní. První část pohonu je připojena k formovací sekci, poháněn je každý průchod sekce, a to jak spodní, tak horní rolna s výjimkou roln bočních. Druhá část pohonu je připojena ke kalibrační sekci, poháněn je každý průchod sekce s výjimkou bočních roln a tzv. tureckých hlav sloužících ke korekci přímosti profilu, ty jsou umístěny na konci kalibrační sekce. Schéma rozdělení pohonů tedy říká, že je profil do svařovací sekce tlačěn sekci formovací, a zároveň vytahován sekci kalibrační. Pohony jsou vůči sobě synchronizovány s drobnou rychlostní korekcí z důvodu prodloužení profilu. Svařovací spára, posléze svar je po celou dobu válcování na horní straně profilu.



Obrázek 47: Schéma válcovací linky

12.2. Svařovací komponenty

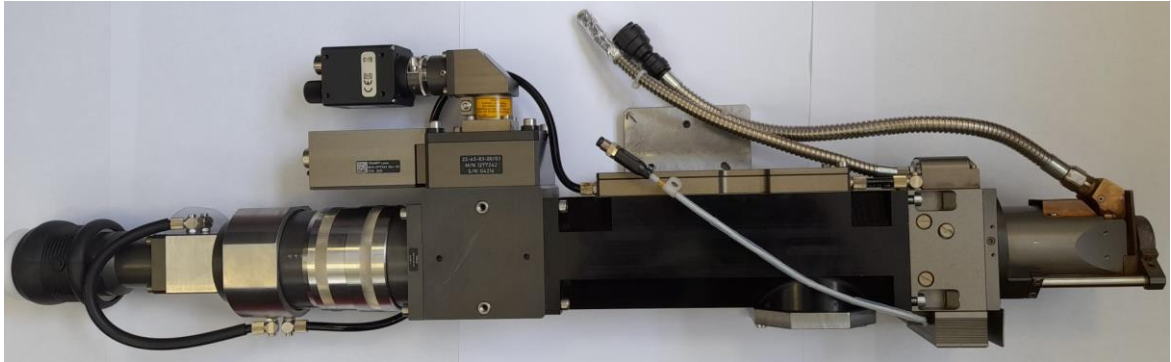
Svařovací sekce je plně krytovaná konstrukce s nepřetržitým odsáváním produktů vzniklých při svařování. Nástroje ve svařovací sekci můžeme rozdělit na 2 podseky, vstupní uzel a svařovací uzel. Vstupní uzel se skládá z 5 průchodů, následující svařovací uzel se skládá ze 2 bočních průchodů. Nad prostřední sekci, tj. svařovacím uzlem s bočními koly se nachází procesní hlava. Procesní hlavu je možné posouvat horizontálně v obou osách, posouvat vertikálně a svisle naklápět vůči ose válcování. Svarová spára je umístěna na horní části trubky, svařování probíhá za osou bočních válcovacích kol.



Obrázek 48: Schéma svařovací sekce

Ochranná atmosféra argonu 4.8 je dodávána externím distributorem umožňujícím regulaci tlaku a průtoku ochranného plynu. Regulace ochranného plynu je rozdělena na 4 sekce, 1. je určena přímo pro místo svaření, následující 3 jsou určeny pro postupně chladnoucí svar. Kvalitní sesazení svarových hran je online kontrolováno 2D skenerem Keyence s automatickou deaktivací chodu linky v případě přesažení stanovených mezí. Přítlak nástrojů u místa svaření (tzv. svařovací kola) jsou opatřena tenzometry pro odečet přítlačné síly.

Instalovaný laserový zdroj je Trumpf Trudisk 3001, technická specifikace tohoto zdroje: plynule nastavitelný výkon v rozsahu 80 až 3 000 W, kvalita paprsku 4 mm · mrad a vlnová délka 1 030 nm. [27]



Obrázek 49: Procesní hlava TRUMPF BEO D70 pro eliptický ARM spot

Z důvodu použití koaxiálního paprsku (ARM) je instalováno optické vlákno LLK-D Bright line 100/400 μm . Instalovaná procesní hlava nese označení BEO D70, jedná se o procesní hlavu do maximálního výkonu 8 kW s kolimační vzdáleností 200 mm a fokusační vzdáleností 300 mm, dochází tedy ke zvětšení svařovacího spotu na 1,5x průměru optického vlákna. [85] Pro testování eliptického spotu byla procesní hlava doplněna o optiku zajišťující ovalitu spotu v poměru 2:1, tzn:

- Jádro
 - Šířka 150 μm , délka 300 μm
- Prstenec
 - Šířka 600 μm , délka 1200 μm

Úprava svařovacích komponent pro eliptický spot spočívá pouze v úpravě procesní hlavy, ostatní komponenty zůstávají beze změny, a to i s použitím dvojitého paprsku, jehož tvar je změněn na eliptický, jedná se proto o kombinaci ARM a eliptického spotu dohromady.

13. POSTUP EXPERIMENTU

Výroba vzorků svarových spojů probíhala přímo na výrobní lince, základní materiál v podobě pásky byl zaveden skrz celou výrobní linku a výroba vzorků probíhala vždy po dobu minimálně 3 minut tak, aby se v zařízení nenacházely trubky jiného nastavení nebo dokonce trubky nesvařené. To je důležité pro eliminaci vlivu zpětného zkroucení trubky po dojetí svaru do kalibrační sekce.

Každý odebraný vzorek byl náležitě označen a vybrán cca z poloviny dané testovací dávky. Výřez pro analýzu byl proveden pásovou pilou s označením směru toku materiálu tak, aby byla při každé analýze jasná pozice svaru v lince (strana obsluhy a zadní strana pohonu). Informace pozice svaru je důležitá zejména z pohledu objasnění vlivu stability, např. rozhodnutí, zda-li je převýšení hran vadou seřizení (přesazená vždy stejná hrana)

nebo stability (přesazení hran se střídá). Dalším parametrem, na který má vliv pozice svaru v lince je oxidace svaru, zde se jedná o ustavení distributoru ochranné atmosféry a pozici odsávací hubice.

Na vyhotovených vzorcích svarových spojů probíhala dále dílenská kontrola kvality:

- a) Vizuální kontrola povrchu svaru - stupňovaná
 - Bez zvětšovacích pomůcek
 - Za použití zvětšovacího skla se zvětšením 10x
 - Za použití digitálního mikroskopu Dino-Lite s maximálním zvětšením 200x, používané zvětšení 5 až 20x
- b) Kontrola provaření a geometrie svaru
 - Za použití digitálního mikroskopu Dino-Lite s maximálním zvětšením 200x, používané zvětšení 100 až 200x
- c) Kontrola vnitřního znečištění
 - Bez zvětšovacích pomůcek
 - Za použití zvětšovacího skla se zvětšením 10x
 - Vnitřní prostory osvětleny umělým světlem

Na základě dílenského vyhodnocení kvality byly prováděny korekce procesních parametrů. Vzorky vyhovující požadavkům dílenské kontroly byly posléze podrobeny laboratornímu posouzení kvality v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, FS ČVUT v Praze (kde byla realizována zkouška makro a mikrostruktury, zkouška tvrdosti a zkouška tahem).

13.1. Postup přípravy vzorků – Kruhový ARM mód

Na začátku samotného testování proběhla výroba vzorků svarových spojů 3 variant nastavení s následným souhrnným vyhodnocením a stanovením dalšího postupu – tj. stanovení přibližných procesních nastavení s daným odstupňováním pro jejich porovnání.

Stanovený postup

- a) Stanovení svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 0/100
- b) Stanovení svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 20/80
- c) Stanovení svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 50/50
- d) Stanovení svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 80/20
- e) Stanovení svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 100/0

- f) Stanovení pozice ohniska laseru
- g) Stanovení průtoku ochranné atmosféry

Jednotlivé testy probíhaly za konstantní rychlosti svařování $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V průběhu testování kruhového ARM módu bylo vyhodnoceno 100 vzorků. Nejvhodnější nalezené nastavení:

- Svařovací výkon 1 650 W
- Pozice ohniska: 1 mm pod povrchem svařence
- Rozdělení výkonu jádro/prstenec: 20/80
- Průtok ochranné atmosféry argonu:
 - Vnější ofuk místa svařování: $25 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 - Vnitřní ofuk místa svařování: $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 - Vnější ofuk za místem svařování: $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

13.2. Postup přípravy vzorků – Eliptický ARM spot

Druhá část experimentu, tedy svařování tvarovým (eliptickým) spotem byla provedena po časové odmlce cca 2 měsíců. Prodleva byla zapříčiněna nutností přestavby procesní hlavy, spočívající v doplnění spodního tubusu s optickou soustavou umožňující tvarování laserového paprsku. Přidáním této soustavy dochází mimo jiné ke zvětšení zástavbových rozměrů procesní hlavy.

Samotná výroba vzorků je částečně shodná s metodou ARM.

- a) Stanovení potřebného svařovacího výkonu pro poměr jádro prstenec 20/80
- b) Stanovení pozice ohniska laseru
- c) Stanovení průtoku ochranné atmosféry

V průběhu testování ARM eliptického módu bylo vyhodnoceno 70 vzorků. Testování bylo zatíženo výrazně komplikovanějším nastavením provozních parametrů, použití eliptického ARM spotu vedlo k masivnímu nárůstu vad svaru citlivějších na provozní parametry než kruhový ARM spot. Shodou okolností bylo nejlepší nalezené nastavení shodné s nastavením použitým pro kruhový ARM spot, viz kapitola 13.1.

13.3. Postup přípravy metalografických vzorků

Vyrobené vzorky svarových spojů pro laboratorní posouzení kvality jsou svařované trubky v délce cca 140 mm dělené pásovou pilou. Z trubek byly uřezány jejich konce metalografickou pilou Struers Labotom 6, řez byl proveden za použití kotouče Struers 46A25, místo řezu bylo intenzivně chlazeno řeznou emulzí pro eliminaci tepelného namáhání vzorků. Oddělené vzorky o délce cca 10 mm byly dále zalisovány do fenolové pryskyřice Struers MultiFast. Lisování bylo provedeno na metalografickém lisu Struers Cito press tak, aby bylo možné ohledání příčného řezu svaru. Zalisované a teplem vytvrzené vzorky byly následně strojně broušeny za postupného zvyšování zrnitosti brusného papíru v krocích 180, 500, 2000, broušení probíhalo pod neustálým proudem vody na metalografické brusce Buehler Beta s automatickou hlavou Vektor. Vybrúšené vzorky byly následně leštěny ve dvou krocích brusnou pastou DiaDuo-2 o zrnitosti 1 μm a následně brusnou pastou Struers MasterPrep o zrnitosti 1 μm a následně 0,05 μm . Na závěr byly metalografické vzorky chemicky leptány po dobu 20 sekund pro zviditelnění hranic zrn, kleptání bylo využito kyseliny HNO_3 a HCl smíchaných v poměru 3:1, po leptání byly vzorky omyty technickým lihem a sušeny proudem teplého vzduchu o teplotě cca 50 °C.



Obrázek 50: Připravené vzorky pro laboratorní analýzu



Obrázek 51: Zalisované vzorky v pryskyřici - Vzorky připravené pro metalografii a měření tvrdosti

13.4. Postup přípravy vzorků k měření mikrotvrdomosti

Základem měření mikrotvrdomosti jsou vzorky zalisované ve fenolové pryskyřici, jejichž příprava je shodná s přípravou metalografických vzorků, která je popsána v předchozí kapitole 13.3.

13.5. Postup přípravy vzorků k měření tažnosti

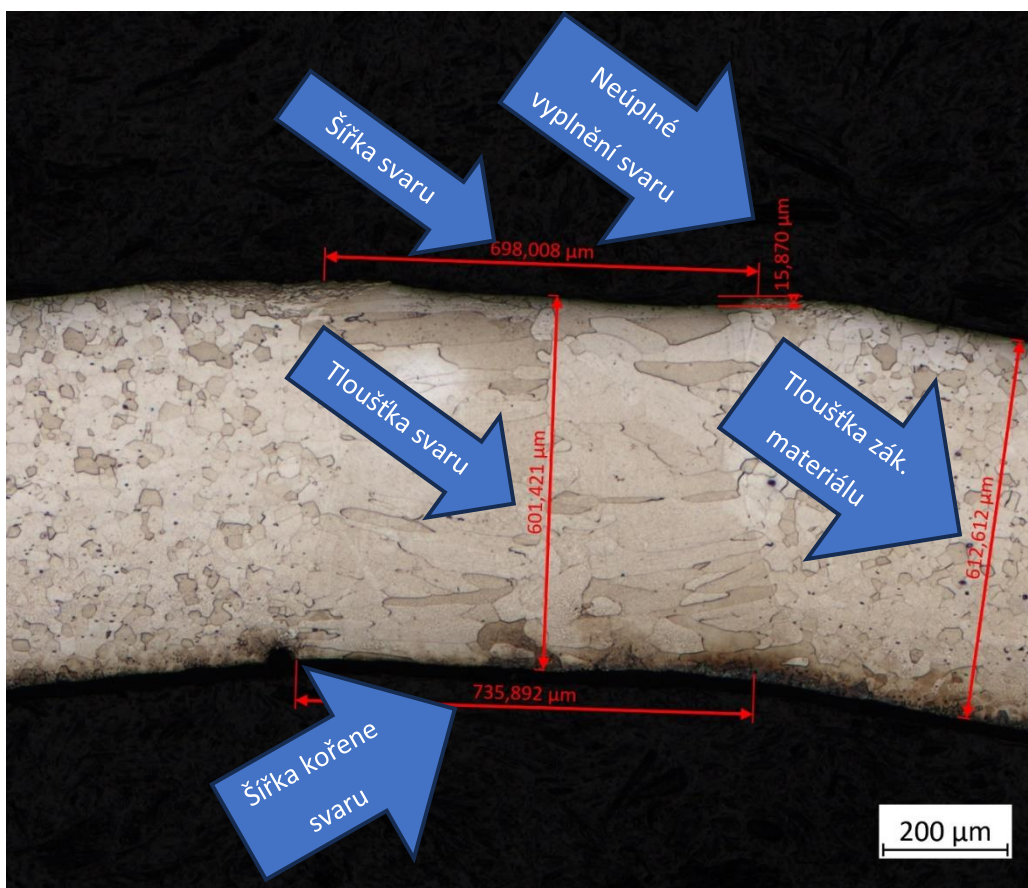
Vyrobené trubky byly za účelem provedení tahové zkoušky naděleny pásovou pilou, konce trubek byly odjehleny a povrch trubek byl v celé délce odmaštěn s důrazem na čistotu koncových částí sloužících k upnutí v trhacím stroji. Z důvodu zajištění dostatečné tuhosti upnutí trubek v čelistech trhacího stroje byly vysoustruženy čepy, které byly vloženy do obou konců testovaných trubek. Čepy byly vyrobeny s ohledem na vnitřní průměr testovaných trubek tak, aby maximální vůle mezi trubkou a čepem byla 0,05 mm.



Obrázek 52: Způsob upnutí trubky v trhacím stroji

13.6. Postup vyhodnocení metalografických vzorků

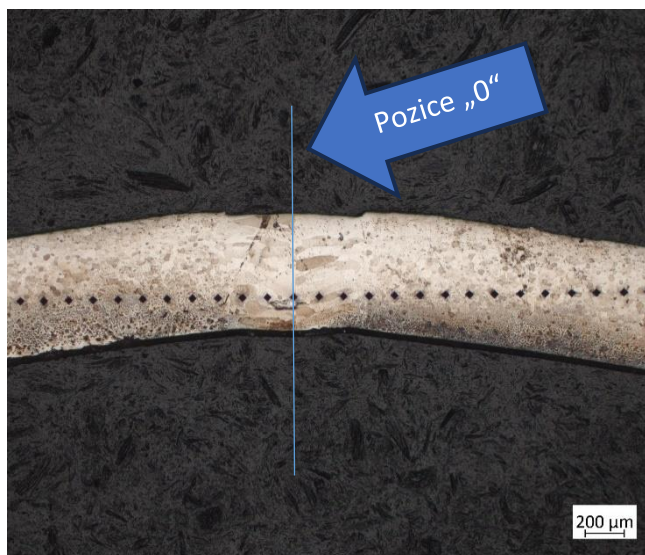
Ohledání a následné vyhodnocení metalografických vzorků bylo provedeno na digitálním světelném mikroskopu Carl Zeiss Axio Observer D1m. Hodnocení metalografických vzorků (tj. zkouška makro a mikrostruktury) bylo provedeno v několika zvětšeních dle zkoumané charakteristiky, geometrie svaru a přilehlých hran materiálu se zvětšením 50x, detail svaru se zvětšením 100x, struktura svaru a základního materiálu se zvětšením 200x a 500x.



Obrázek 53: Legenda měření rozměrů

13.7. Postup vyhodnocení mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na zařízení Buehler IndentaMet 1104. S ohledem na velikost testované plochy a minimální požadovanou vzdálenost vtisků mezi sebou a taktéž hranou materiálu bylo zvoleno měření HV0,2, tedy zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse se zatížením 0,2 kgf. Pro zkoušku byl použit normou předepsaný indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°. Místo vpichu bylo určeno na základě optického ohledání se



Obrázek 54: Pozice měření mikrotvrdosti HV0,2

zvětšením 400x, vpichy byly umístěny ve středové oblasti tloušťky stěny. Měřen byl průběh mikrotvrdosti v celém svarovém spoji (oblast základního materiálu, TOO a svaru) v souladu s ČSN EN ISO 9015. Průběh mikrotvrdosti byl měřen z pravé i levé strany svaru (viz obr. 54).

13.8. Postup vyhodnocení tahové zkoušky

Při tahové zkoušce je zaznamenáván průběh rostoucího zatížení a prodloužení vzorku. Získané hodnoty jsou následně přepočteny na napětí (mez kluzu, mez pevnosti) a poměrné prodloužení. Získané hodnoty slouží pro ověření mechanických vlastností svařené trubky jako celku, samostatný svar nebyl s ohledem na jeho velikost testován. Získané výsledky vypovídají více o procesu válcování (čerpání plasticity) než o samotném svařování. Získané výsledky jsou porovnány s materiálovým listem, který uvádí vlastnosti základního materiálu ve vyžádaném stavu.

14. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

14.1. Vyhodnocení vizuální kontroly svarového spoje

Výsledky vizuálního ohledání svaru jsou shodné pro obě testované metody. Svary jsou celistvé v celé své délce, povrch svarů je pravidelný včetně okolní oblasti obou stran svaru. Svary ani TOO nevykazují vadu okujeného povrchu (613) ani náběhového zbarvení (610). Povrch svarů ani jeho okolí nevykazuje žádné další vady, vnitřní prostor trubek je bez znečištění od svařování (rozstřík svarového kovu). Nejsou viditelné ani žádné vady způsobené po svaření (otlaky, vrypy). Navedení hran pásky je symetrické z obou stran svaru. Tvar trubek je kruhový s minimální ovalitou takřka bez znatelné změny geometrie v oblasti svaru.

14.2. Vyhodnocení makrostruktury svarového spoje

Tabulka 7: Porovnání metalografických výbrusů svaru 1A až 2B,

*A po směru svařování, *B proti směru svařování

| Porovnání metalografických výbrusů svaru | | |
|--|------------------|--------------------|
| Vzorek č. | Kruhový ARM spot | Eliptický ARM spot |
| 1A | | |
| 1B | | |
| 2A | | |
| 2B | | |

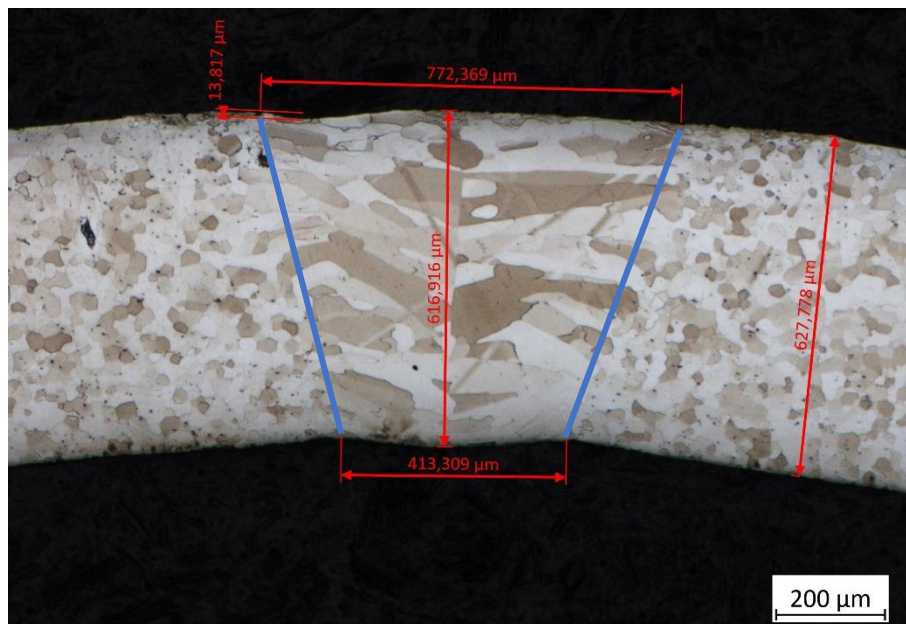
Testované vzorky jsou rozděleny do dvou základních kategorií, které jsou obě vyrobeny za použití ARM spotu, avšak s rozdílným tvarem (kruhový vs. eliptický). Porovnání podoby svarů je provedeno v tab. 7 a 8. a Vzorky jsou označeny pořadovým číslem doplněným indexem, index A pro výbrus svaru ve směru svařování a index B pro směr proti svařování, vzájemná vzdálenost výbrusů je cca 100 mm.

Tabulka 8: Přehled základních rozměrů testovaných svarů

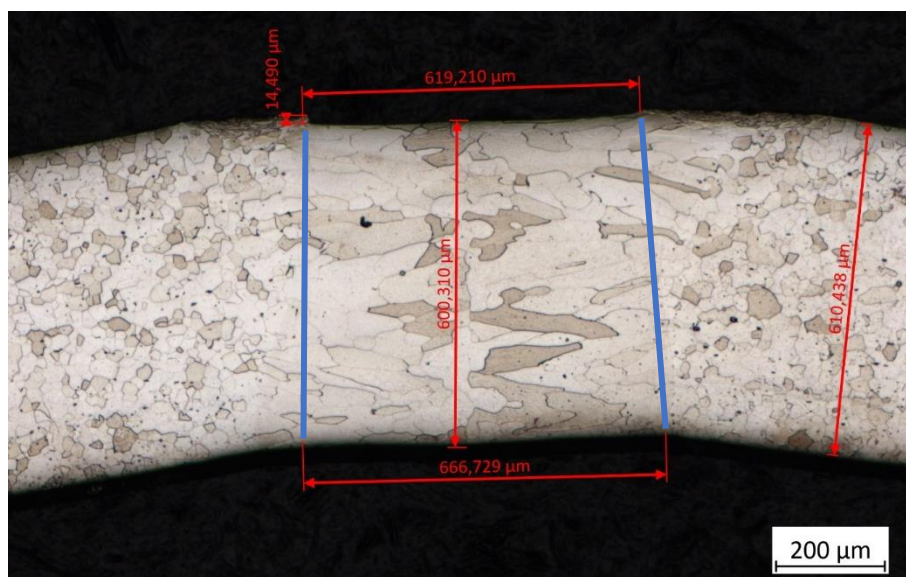
| Typ | Vzorek č. | Šířka svaru | Šířka kořene | Tloušťka svaru | Tloušťka základního materiálu | Neúplné vyplnění |
|-----------------------|-----------|-------------|--------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Kruhový ARM spot | 1A | 714 | 510 | 595 | 625 | 29 |
| | 1B | 709 | 529 | 599 | 621 | 23 |
| | 2A | 678 | 444 | 613 | 632 | 29 |
| | 2B | 733 | 432 | 611 | 593 | 16 |
| | 3A | 772 | 413 | 617 | 628 | 14 |
| | 3B | 722 | 442 | 615 | 597 | 16 |
| | 4A | 743 | 411 | 607 | 616 | 11 |
| | 4B | 739 | 472 | 597 | 601 | 0 |
| | Průměr A | 727 | 445 | 608 | 625 | 21 |
| | Průměr B | 726 | 469 | 605 | 603 | 14 |
| | Průměr | 726 | 457 | 607 | 614 | 17 |
| Eliptický ARM spot | 1A | 628 | 660 | 590 | 609 | 21 |
| | 1B | 619 | 667 | 600 | 610 | 14 |
| | 2A | 621 | 617 | 591 | 634 | 19 |
| | 2B | 698 | 736 | 601 | 613 | 16 |
| | 3A | 674 | 675 | 591 | 593 | 22 |
| | 3B | 642 | 679 | 592 | 616 | 18 |
| | 4A | 629 | 701 | 591 | 609 | 18 |
| | 4B | 608 | 642 | 589 | 621 | 17 |
| | Průměr A | 638 | 663 | 591 | 611 | 20 |
| | Průměr B | 642 | 681 | 596 | 615 | 16 |
| | Průměr | 640 | 672 | 593 | 613 | 18 |
| Rozdíl kr. a el. spot | | -86 | 216 | -13 | -1 | 1 |

Hlavní rozdíl mezi kruhovým a eliptickým spotem je šířka kořene svaru, u které je průměrná hodnota šířky svaru eliptického ARM spotu větší o 216 μm , druhým největším měřeným rozdílem je menší šířka svaru v jeho horní části, a to v průměru o 86 μm . Svar eliptického ARM spotu se s rostoucí hloubkou průvaru mírně rozšiřuje, zatímco svar kruhového ARM spotu má typický V tvar. Z pohledu kvalitního svaření je vhodnější variantou eliptický ARM spot, a to z důvodu větší šířky kořene svaru lépe kompenzující případnou vzájemně nepřesnou polohu svarové spáry a laserového paprsku při zachování srovnatelné celkové velikosti svaru, a tedy celkového vneseného tepla do svařence. Ani jedna z testovaných variant takřka neobsahuje vadu nadměrného průvaru (504) nebo prolákliny (509), které by odhalila zkouška makrostruktury. Neúplné vyplnění svaru (511) je taktéž u obou testovaných variant srovnatelné.

Průměrný rozdíl je jen 1 μm . Výbrus svaru 1A kruhového ARM spotu a svar 1B eliptického spotu obsahují zápal (501) v kombinaci s neúplným vyplněním svaru (511). Vzorek 2B eliptického ARM spotu je jako jediný zasažen vadou jednostranně neprovařeného kořene (4021), jehož příčinou je pravděpodobně nepřesná poloha svařovacího paprsku vůči navedeným hranám pásky. Šířka vady je 38 μm a hloubka 22 μm . Geometrie svaru je osově shodná v obou směrech vůči svařování bez známek pravidelného výskytu vad na jedné či druhé straně způsobených např. pozicí válcovacích nástrojů. Šířka svaru odpovídá zvolené výrobní technologii laserového svařování.



Obrázek 55: Geometrie ARM kruhového svaru, hranice svaru vyznačena modře



Obrázek 56: Geometrie ARM eliptického svaru, hranice svaru vyznačena modře

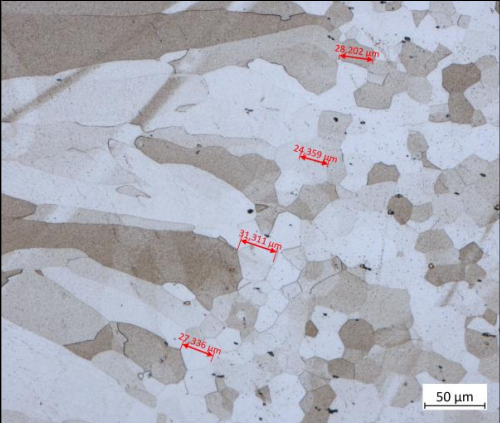
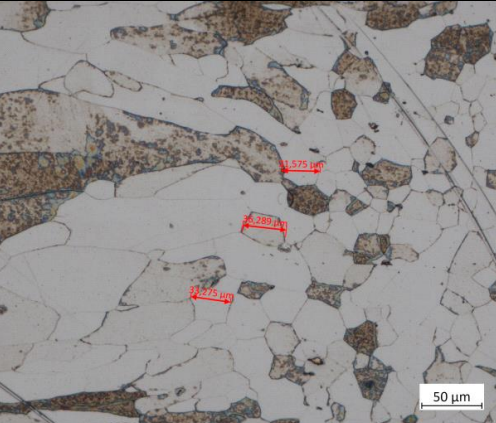

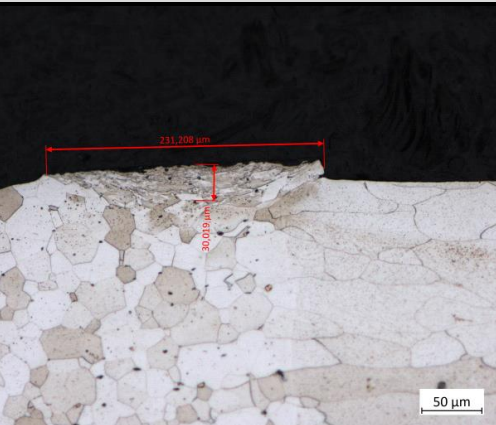
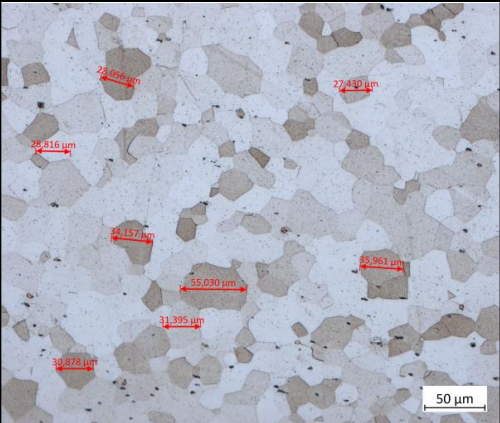
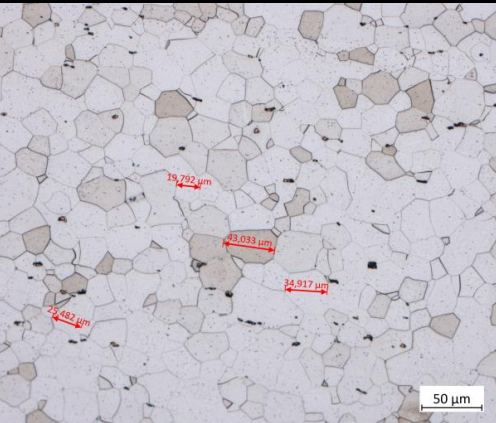
14.3. Vyhodnocení mikrostruktury svarového spoje

Osa svaru je dělicí rovinou, dendritických zrn orientovaných ve směru tuhnutí kovu. V případě eliptického ARM spotu není hranice svaru jednoznačná, a to zejména s rostoucí hloubkou průvaru. Šířka nejednoznačné oblasti dosahuje velikosti cca 100 μm . TOO vnějšího povrchu trubky obsahuje zjemněné zrno s nepříliš výraznou texturou, zrna jsou delší ve směru vodorovné osy X, podoba struktury je shodná u obou testovaných variant, příčinou vzniku textury v této oblasti může být a) tepelné ovlivnění svařovacího procesu b) tváření svařeného profilu za studena, ač minimálně, tak tato oblast převyšuje svar, čímž dochází k lokálnímu nárůstu tlaku při následném formování ovlivňujícím vnitřní strukturu materiálu. TOO zbývající části materiálu obou testovaných variant není nikterak výrazná a plynule přechází do základního materiálu, velikost zrn nepřesahuje velikost zrn základního materiálu, je však viditelná zvýšená četnost zrn přesahujících velikost 25 μm v sousední oblasti dendritických zrn svaru. Textura po tváření není přítomna, totéž platí pro absenci příznaků tepelného zpracování. Majoritní část černých teček pochází z obrusu fixační pryskyřice, nazlátlé tečky s černým ohraničením jsou pravděpodobně nitridy, případně karbidy titanu. Pro potvrzení tohoto tvrzení by ale byla nezbytná chemická analýza, tvrzení vychází z předpokladu daného chemickým složením vstupního materiálu.

Tabulka 9: Porovnání metalografických výbrusů makro a mikro struktury

| Metalografické výbrusy | |
|--|--|
| Kruhový ARM spot | Eliptický ARM spot |
| <p>Celkový pohled na svar (zvětšení 50x)</p> | <p>Celkový pohled na svar (zvětšení 50x)</p> |
| <p>Detail svaru (zvětšení 100x)</p> | <p>Detail svaru (zvětšení 100x)</p> |
| <p>Detail struktury svaru (zvětšení 200x)</p> | <p>Detail struktury svaru (zvětšení 200x)</p> |

Tabulka 10: Porovnání metalografických výbrusů mikrostruktury

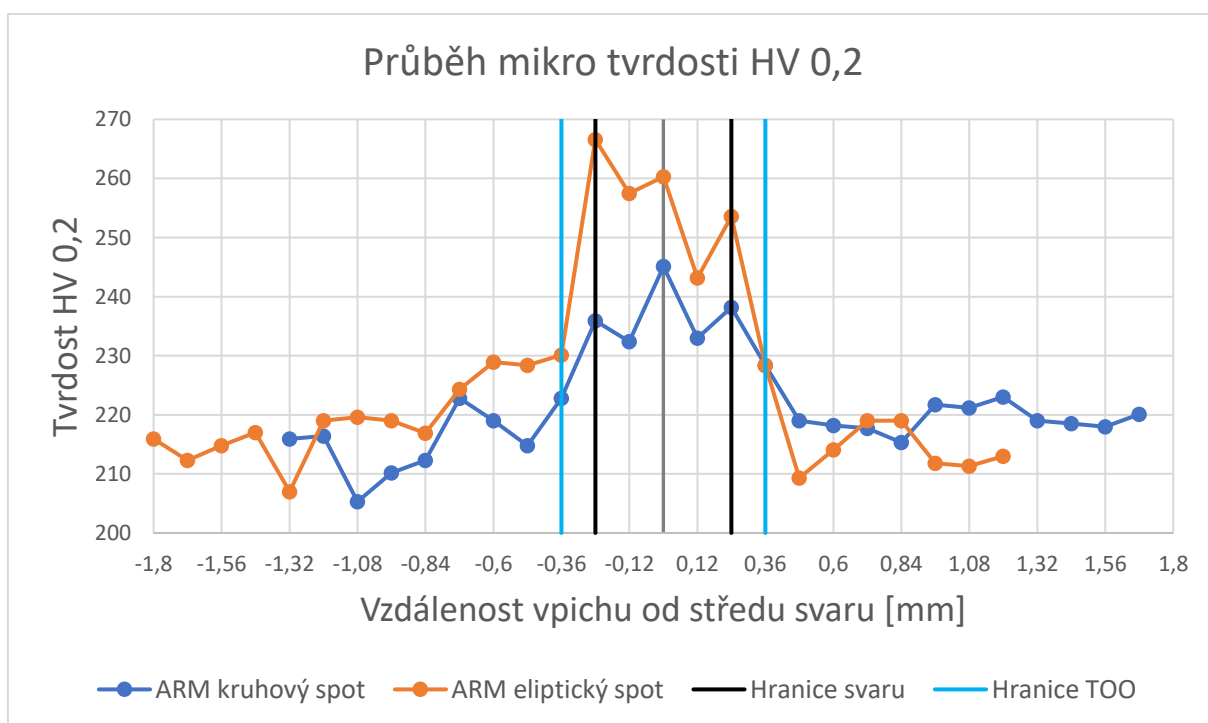
| Metalografické výbrusy | |
|---|--|
| Kruhový ARM spot | Eliptický ARM spot |
| Detail struktury TOO (zvětšení 200x) | Detail struktury TOO (zvětšení 200x) |
|  |  |
| Detail struktury TOO na povrchu trubky (zvětšení 200x) | Detail struktury TOO na povrchu trubky (zvětšení 200x) |
|  |  |
| Detail struktury základního materiálu (zvětšení 200x) | Detail struktury základního materiálu (zvětšení 200x) |
|  |  |

14.4. Vyhodnocení mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na dvou vzorcích, v obou případech se jednalo o vzorek 1A od obou testovaných variant. Místa měření tvrdosti (vpichy) byly vyhotoveny s jednotnou roztečí 0,12 mm, první vpich byl vyhotoven v základním materiálu nalevo od svaru, následující vpichy postupně ve stanovené rozteči směrem doprava přes TOO, svarový kov, druhou stranou TOO a základní materiál, viz obr. 54.

Tvrdost základního materiálu je v obou případech podobná (207 až 223 HV_{0,2}), rozdíl je ale viditelný v oblasti svaru. Tvrdost svaru je měřena na 5-ti místech.

V případě svaru ARM kruhového spotu je mikrotvrdost svaru měřena na pozicích -0,24 mm až 0,24 mm, kde se pohybuje okolo průměrné hodnoty 237HV_{0,2}. Zvýšená tvrdost v blízkosti svaru a TOO je viditelná pouze na pravé straně od svaru na pozici 0,36 mm, kde se tvrdost pohybuje okolo hodnoty 228 HV_{0,2}. Nižší mikrotvrdost nalevo od svaru lze vysvětlit větší vzdáleností vpichu od hranice svaru. Průběh mikrotvrdosti svaru, TOO i základního materiálu nese spojení s mikrostrukturou, potvrzuje se i minimální velikost TOO, hodnocená na základě velikosti zrna materiálu.



Obrázek 57: Graf průběhu mikrotvrdosti HV_{0,2}

V případě ARM eliptického spotu je mikrotvrdost svaru měřena na pozicích -0,24 mm až 0,24 mm, a to s průměrným výsledkem mikrotvrdosti 256 HV_{0,2}. Maximální hodnota mikrotvrdosti je na pozicích -0,24 mm až 0 mm, u kterých dosahuje průměrně 261 HV_{0,2}.

Lze tedy konstatovat, že mikrotvrdost svaru vyhotoveného ARM eliptickým spotem je vyšší se strmějším nárůstem vůči základnímu materiálu a TOO než u svaru vyhotoveného ARM kruhovým spotem. Průběh tvrdosti v TOO a základním materiálu je s ohledem na rozptyl měřených hodnot symetrický vůči pozici svaru a odpovídá předpokladu dle pozorované mikrostruktury.

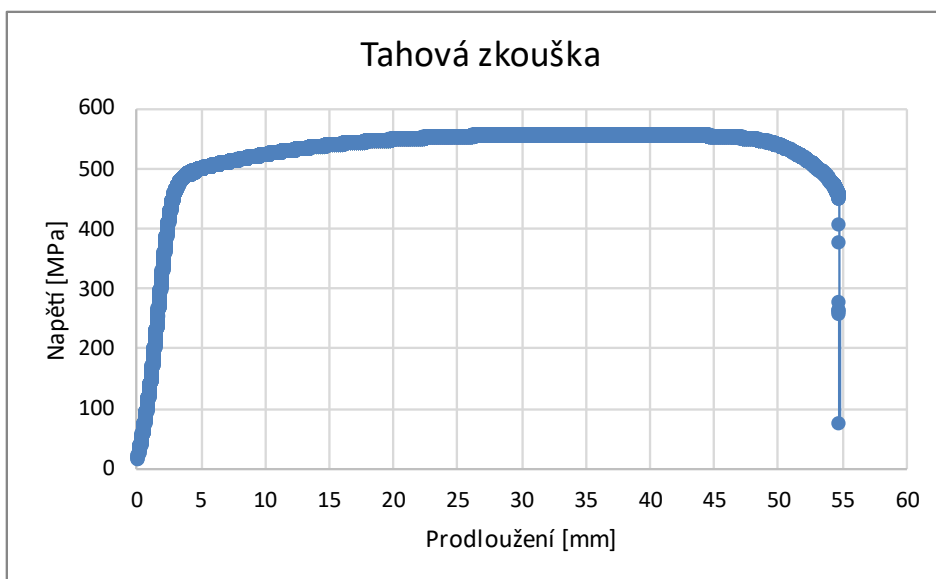
14.5. Vyhodnocení tahové zkoušky

Tahová zkouška byla realizována pouze na vzorcích vyrobených za použití kruhového ARM spotu přímo na výrobní lince. Vzorky z eliptického ARM spotu nebyly testovány z provozních a časových důvodů, lze ale předpokládat výraznou podobnost výsledků pevnosti, průtahu i charakteru porušení. S ohledem na malou velikost svarů danou zvolenou výrobní technologií LBW lze tuto zkoušku považovat za doplňkovou. Rozptyl



Obrázek 58: Přetržená trubka z tahové zkoušky

provedených měření tažnosti je minimální, smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ oceli není s ohledem na způsob upnutí trubky jednoznačná podobně jako přesné odečtení tažnosti materiálu, mez pevnosti opakovaně dosahuje hodnoty $R_m = 560$ MPa. Materiálový list vstupního materiálu udává $R_{p0,2} \geq 210$ MPa, $R_m = 350$ až 560 MPa, $A = \min 25\%$. Při porovnání získaných dat je zřejmé, že výrobní proces nezpůsobil výrazné vyčerpání plasticity základního materiálu, a tudíž nehrozí vznik vad souvisejících s nadměrným tvářením.



Obrázek 59: Graf tahové zkoušky

S ohledem na minimální vyčerpání plasticity materiálu lze předpokládat, že již vstupní materiál dosahoval horní meze R_m , a že jeho vysoká hodnota není způsobena zpracovatelským procesem. Lze konstatovat, že zvolená výrobní technologie válcování i svařování produkuje finální výrobek vhodný pro další tváření za studena, a to i bez předchozího TZ.

15. ZÁVĚR

Aplikaci eliptického ARM spotu nelze na základě provedených testů jednoznačně doporučit. Silným argumentem proti použití eliptického ARM spotu je zejména zvýšený výskyt vad svaru, jejichž výskyt je výrazně citlivější na vhodné nastavení provozních parametrů než u konvenčního kruhového ARM spotu. Tyto vady byly detekovány VT již při dílenské kontrole, která byla součástí testovací výroby vzorků určených k laboratornímu vyhodnocení. Na základě výsledků dílenské kontroly bylo postupně optimalizováno provozní nastavení výrobního procesu a nejlépe hodnocené vzorky byly odebrány pro následující laboratorní vyhodnocení. S ohledem na skutečnost, že pro laboratorní vyhodnocení vzorků byly vybrány nejlepší svarové spoje z obou porovnávaných technologií kruhového i eliptického ARM spotu nejsou získané výsledky zasaženy touto výrobní komplikací a nikterak nezohledňují obtížnější dosažení požadované podoby svarového spoje eliptického ARM spotu.

Pokud porovnáme získané laboratorní výsledky, můžeme konstatovat, že vhodnější geometrií svaru pro vyhotovení tupých svarů disponuje eliptický ARM spot, u kterého nedochází ke zužování svaru s rostoucí hloubkou průvaru, tak jako u kruhového ARM spotu. Veškeré laboratorně analyzované vzorky byly vyrobeny s totožným procesním nastavením, a tedy totožnou velikostí vneseného tepla, čemuž odpovídá srovnatelná velikost svaru pouze s rozdílem jeho geometrie. Naopak nevýhodou eliptického ARM spotu je zvýšená tvrdost svaru vedoucí k zvětšení rozdílu mechanických vlastností svaru a základního materiálu. Výskyt vad svaru jako jsou trhliny, neprůvary, vady geometrie a rozměru atp. není použitím eliptického ARM spotu ovlivněn. S ohledem na uvedené nevýhody eliptického ARM spotu doplněné o zvýšené finanční náklady a technologickou složitost zařízení nelze pro zkoumaný výrobní proces doporučit použití eliptického ARM spotu. Avšak lze předpokládat výhodné použití eliptického ARM spotu pro svařování tlustostěnných ocelí (tl. přes 4 mm), u nichž roste důležitost použití minimálně se zužujícího svaru s rostoucí hloubkou průvaru. Pro potvrzení uvedeného předpokladu je vhodné pokračovat ve výzkumu vlivu použití eliptického či jinak tvarovaného spotu. Na závěr je vhodné zdůraznit, že srovnání bylo provedeno za použití ARM módu u obou tvarů laserového spotu, který sám o sobě vykazuje lepší výsledky v porovnání se svařováním konvenčním Gaussovským paprskem, a proto se mohou získané výsledky lišit s obdobným testem bez použití ARM módu.

BIBLIOGRAFIE

- [1] SEJPKA, Ladislav. *Historie svařování v českých zemích: Úvod do historie svařování. Poznámky k historii obloukového svařování* [online]. In: . 2009, 13.5.2009 [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=282>
- [2] OXYGEN SERVICE. *Explaining Laser Welding* [online]. [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: <https://www.oxygenservicecompany.com/explaining-laser-welding/>
- [3] VERIFORM. *When was laser welding invented?* [online]. 2024, 2.2.2024 [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: <https://veriform.ca/when-was-laser-welding-invented/>
- [4] ČSN 05 1309 - *Svařitelnost kovů a její hodnocení Všeobecné ustanovení*. 1991.
- [5] *Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídatných materiálů* [online]. In: . ESAB [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/N1_svaritelnost_materialu_ESAB.pdf
- [6] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí: Teorie spojování a dělení materiálů* [online]. 49 s. [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/406327/mod_resource/content/2/5_korozivzd_oceli_I.pdf. Výuková prezentace. FS ČVUT Ústav strojírenské technologie, Skupina svařování.
- [7] METALCOR. *Datasheet 1.4512 (AISI 409)*. 1 s. Dostupné také z: <https://www.metalcor.de/en/datenblatt/27/>
- [8] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí II: Teorie spojování a dělení materiálů* [online]. 60 s. [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/407386/mod_resource/content/2/6_korozivzd_oceli_II.pdf. Výuková prezentace. FS ČVUT Ústav strojírenské technologie, Skupina svařování.
- [9] ČSN EN ISO 4063 - *Svařování, pájení na tvrdo, pájení na měkko a řezání - Přehled metod a jejich číslování*. Česká agentura pro standardizaci, prosinec 2023.
- [10] *Svařování elektrickým obloukem* [online]. In: ELEKTRONICKÁ UČEBNICE. [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1806#:~:text=Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%2>

Oelektrick%C3%BDm%20obloukem%20je%20tavn%C3%A9,a%20po%20ztuhnut%C3%AD%20vznik%C3%A1%20svar.

- [11] *Technologie svařování: Svařování elektrickým obloukem* [online]. In: . s. 30 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_l_svarovani_kubicek.pdf
- [12] *Metoda TIG - základní seznámení* [online]. In: . [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/metoda-tig-zakladni-seznameni/>
- [13] *Svařování elektronovým svazkem: Základní informace o technologii* [online]. [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://ebt.isibrno.cz/domu/svarovani-elektronovym-svazkem/svarovani-technologie/>. Akademie věd České republiky, Ústav přístrojové techniky.
- [14] KOLARÍK, Ladislav, Tomáš KRAMÁR, Petr VONDROUŠ, Karel KOVANDA a Jaroslav MÁLEK. *Elektronové svařování - perspektivní metoda pro speciální materiály* [online]. In: . MM Průmyslové spektrum, 2016, 10.2.2016 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy>
- [15] *Svařování elektronovým paprskem* [online]. In: . Bodycote [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/spojovani-kovu/svarovani-elektronovym-paprskem/#:~:text=Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20elektronov%C3%BDm%20paprskem%20je%20metoda,sestavy%20z%C5%AFst%C3%A1v%C3%A1%20chladn%C3%A1%20a%20stabiln%C3%AD.>
- [16] BRÁZDA, Michal. *Svařování vysokopevné oceli laserem a elektronovým paprskem* [online]. 2017 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27360/1/BP_Michal_Brazda_Svarovani_vysokopevne_oceli_laserem_a_elektronovym_paprskem.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Kašpar.
- [17] *Obrábění elektronovým paprskem* [online]. In: ELEKTRONICKÁ UČEBNICE. [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1421>
- [18] MARTINÁK, Josef. *Svařování paprskem: Výukový program: Strojírenská technologie* [online]. In: . [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2985246/>

- [19] *Svařování ultrazvukem* [online]. In: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_ultrazvukem_mrna.pdf
- [20] MOSTAFAVI, Shimaalsadat, Daniel FRANK HESSER a Bernd MARKERT. *Effect of process parameters on the interface temperature in ultrasonic aluminum wire bonding* [online]. In: . Science Direct, 2018, 4.10.2018, s. 11 [cit. 2024-06-25].
- [21] T. FUJII, Hiromichi, Yuta GOTO, Yutaka S. SATO a Hiroyuki KOKAWA. *Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel* [online]. In: . Science Direct, 2016, 18.2.2016, s. 4 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: doi:10.1016/j.scriptamat.2016.02.004
- [22] KATAYAMA, Seriji. JOINING AND WELDING RESEARCH INSTITUTE. *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Springer Singapore, 2020, 198 s. ISBN 978-981-15-7935-6.
- [23] *Laserové svařování* [online]. In: . Laser Therm [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [24] DURDA, Tomáš. *Lasery a jejich využití v civilním / vojenském letectví* [online]. Brno, 2016 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127650.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.
- [25] PLCH, Filip. *Zelená vlna pro svařování mědi* [online]. In: TRUMPF. MM Průmyslové spektrum, 2016, 8.3.2016 [cit. 2024-06-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zelena-vlna-pro-svarovani-medi>
- [26] DUŠEK, Jiří. *Zelené a UV lasery* [online]. In: . Mega Blog, 2012, 23.3.2012 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [27] *Diskový laser: TruDisk* [online]. In: . Trumpf [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/
- [28] *Compact Diode Laser: LDM Series: The Compact Class for Diode Lasers* [online]. In: . Laserline [cit. 2024-08-02]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/ldmseries/>

- [29] MULLANEY, Kevin. *The fabrication of micro-tapered optical fibres for sensing applications* [online]. 2016, 235 s. [cit. 2024-07-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321304609_The_fabrication_of_micro-tapered_optical_fibres_for_sensing_applications. Disertační práce. Cranfield University. Vedoucí práce Ralph Tatam, Stephen James.
- [30] M. STEEN, William a Jyotirmoy MAZUMDER. *Laser Material Processing*. 4. vydání. Springer, 2010. ISBN 978-1-84996-062-5.
- [31] JUREK, Marek. *Typy laserových zářičů* [online]. In: . 2020, 23.9.2020 [cit. 2024-07-18]. Dostupné z: <https://jurekdesign.cz/teorie/409/>
- [32] *Laser* [online]. In: . s. 22 [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: <https://digilander.libero.it/marpic/capitolo1.pdf>
- [33] *Laser Welding Versus ARC Welding: PhotonWeld Versus Laser Welding* [online]. In: . [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: https://photonweld.com/photonweld-laser-welding-technology-and-laser-welding-ecology/photonweld-versus-arc-welding?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR2wa-nzNFx5ADtO3q1twQhHvaYUy9--o1c6uKiWtC0j6jXxlosvshbC18U_aem_wCKnq-9lnS8805IRpYTUdg
- [34] *Kondukční svařování* [online]. In: . Trumpf [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcni-svarovani/
- [35] *Heat Conduction Welding with an Excellent Welded Seam* [online]. In: . Laserline [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/heat-conduction-welding/#:~:text=The%20welding%20method,sheets%20with%20low%20material%20thickness>
- [36] PRIMUS, Tomáš. *Technologie svařování laserem* [online]. In: . [cit. 2024-07-21]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laserovy-den-pro-stredni-skoly/>
- [37] ČSN EN ISO 13919-1 - *Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Požadavky a doporučení pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [38] ČSN EN ISO 6520-1 - *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [39] ČSN EN ISO 5817 (050110) Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Stupně kvality pro vady. Česká agentura pro standardizaci, listopad 2023.
- [40] Vady ve svarech: Vady svarů. Proč vznikají, jaké jsou a jak jim předcházet [online]. In: SVÁŘECÍ KUKLA. [cit. 2024-06-27]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/blog/vady-ve-svarech/>
- [41] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení [online]. In: ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB. 2012, 1.3.2012 [cit. 2024-06-27]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [42] ČSN EN ISO 13919-1 Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel. Český normalizační institut, 1997.
- [43] Druhy koroze kovů [online]. In: AV EQUEN. s. 9 [cit. 2024-06-27]. Dostupné z: <https://www.av-equen.cz/wp-content/uploads/2020/10/Druhy-koroze.pdf>
- [44] ČSN EN ISO 17637 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů. Česká agentura pro standardizaci, říjen 2017.
- [45] ČSN EN 13018 - Nedestruktivní zkoušení - Vizuální zkoušení - Obecné zásady. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2016.
- [46] JANDURA, Václav. Vizuální kontrola: Vizuální kontrola jako metoda NDT v současné průmyslové praxi [online]. In: . 2007, 15.1.2007 [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://www.tlakinfo.com/t.py?t=2&i=1359&h=133>
- [47] ČSN EN ISO 3452-1 - Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady. Česká agentura pro standardizaci, prosinec 2021.
- [48] ČSN EN ISO 23277 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, březen 2016.
- [49] ŠALOUN, Jan. Nedestruktivní zkoušení svarů [online]. Brno, 2021 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/eeeac907-5ec3-4020-b35f-080f7ec4e012/content>. Bakalářská práce. VUT Fakulta strojního inženýrství Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

- [50] ČSN EN ISO 9934-1 - Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Obecné principy. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, květen 2017.
- [51] ČSN EN ISO 23278 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Stupně přípustnosti. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, březen 2016.
- [52] NDT zkoušky - metody MT+UT [online]. In: . Vaněk Welding [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://vanek-welding.cz/mt-ut-kontroly.html>
- [53] Magnetická metoda prášková [online]. In: . Weld Inspect [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://www.weldinspect.cz/magneticka-metoda-praskova>
- [54] ČSN EN ISO 16810 - Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem - Obecné zásady. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2014.
- [55] Obecný úvod k ultrazukovému testování [online]. In: . Evident [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/intro/ut/>
- [56] Ultrazuková technika zkoušení TOFD (Time Of Flight Diffraction) [online]. In: . PTS Josef Solnař [cit. 2024-08-08]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/ut-ndt-zkouseni-ultrazvukem/ut-zkouseni-tofd#:~:text=TOFD%20je%20modern%C3%AD%20technika%20NDT,detekci%20creepov%C3%A9ho%20po%C5%A1kozen%C3%AD%20parn%C3%ADho%20potrub%C3%AD>
- [57] Ultrazukové převodníky Panametrics: TOFD [online]. In: EVIDENT. [cit. 2024-08-08]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/ultrasonic-transducers/tofd/>
- [58] ČSN EN ISO 17636-1 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film. Česká agentura pro standardizaci, březen 2023.
- [59] ČSN EN ISO 17636-2 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 2: Metody rentgenového a gama záření využívající digitální detektory. Česká agentura pro standardizaci, říjen 2022.
- [60] ČSN EN ISO 17643 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkouška svarů vířivými proudy analýzou komplexní roviny. duben 2016.

- [61] BAŽANT, Jiří. *Defektoskopie vířivými proudy pomocí diferenčních reflexních snímačů* [online]. červen 2008, 34 s. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://www.fm.tul.cz/document/227#:~:text=Defektoskopie%20v%C3%AD%C5%99iv%C3%BDmi%20proudy%20je%20metoda,metod%20pracuj%C3%ADc%C3%ADch%20na%20principu%20elektromagnetismu..> Autoreferát disertační práce. TUL Fakulta mechatroniky a mezipředmětových inženýrských studií. Vedoucí práce Ivan JAKSCH.
- [62] VACHUDA, Viktor. *Detekce povrchových vad s využitím vířivých proudů* [online]. 2017 [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27530/1/BP%20Defekce%20povrchovych%20vad%20s%20vyuzitim%20virivych%20proudu_Vachuda.pdf. Bakalářská práce. ZČÚ Fakulta elektrotechnická Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. Vedoucí práce Pavel Karban.
- [63] ČSN EN ISO 17639 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Česká agentura pro standardizaci, listopad 2022.
- [64] KAPSA, Vlastimil. *Analýza parametrů kvality svarových spojů vysokopevných ocelí při stavbě karoserií* [online]. Pardubice, 2009 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/l37uzr/>. Disertační práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Eva Schmidová.
- [65] *Standard Practice for Preparation of Metallographic Spiecement: ASTM E3* [online]. In: . [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2680/2/ASTM%20E3.pdf>
- [66] *Standardní příručka pro přípravu metalografických vzorků ASTM E3* [online]. In: . Eurolab [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.laboratuar.com/cs/testler/metal-test-laboratuvari/astm-e3-metalografik-numunelerin-hazirlanmasi-icin-standart-kilavuz/>
- [67] *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys1: ASTM E407* [online]. In: . [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7258/05c1352d61c94fb9a5f115dc28e7839b/A STM-E407-99.pdf>

- [68] ČSN EN ISO 6892-1 - *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, leden 2017.
- [69] ČSN EN ISO 4136 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Česká agentura pro standardizaci, únor 2023.
- [70] ČSN EN ISO 5178 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. Česká agentura pro standardizaci, březen 2020.
- [71] TREJTNAR, Josef. Destruktivní zkoušky svarových spojů. *Techportal* [online]. 2017, 18.9.2017 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Eoqedn9lqOoGWh5CTKyYaSk/#:~:text=Destruktivn%C3%ADmi%20zkou%C5%A1kami%20ov%C4%9B%C5%99ujeme%20u%C5%BEitn%C3%A9%20vlastnosti,%2C%20v%C3%BDskyt%20defekt%C5%AF%20apod.\)](https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Eoqedn9lqOoGWh5CTKyYaSk/#:~:text=Destruktivn%C3%ADmi%20zkou%C5%A1kami%20ov%C4%9B%C5%99ujeme%20u%C5%BEitn%C3%A9%20vlastnosti,%2C%20v%C3%BDskyt%20defekt%C5%AF%20apod.))
- [72] KOPECKÝ, Lukáš. *Destruktivní metody kontroly svarových spojů* [online]. [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/eaf1cd42-45e0-4955-8a03-581b95f20193/content>. Bakalářská práce. VUT Fakulta strojního inženýrství Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Mojmír Vaněk.
- [73] ČSN EN ISO 9015-2 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Česká agentura pro standardizaci, říjen 2018.
- [74] ČSN EN ISO 9015-1 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2011.
- [75] ČSN EN ISO 6507-1 - *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Česká agentura pro standardizaci, květen 2024.
- [76] ČSN EN ISO 6507-2 - *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 2: Ověřování tvrdoměrů Vickers*.
- [77] *Vickers hardness testing (DIN EN ISO 6507)* [online]. In: . Metalco Material Testing [cit. 2024-07-29]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/vickers/>

- [78] ČSN EN ISO 148-1- *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Červen 2017.
- [79] ČSN EN ISO 9016 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Česká agentura pro standardizaci, prosinec 2022.
- [80] *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. In: . [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/39e16683-51fd-4bf6-ba54-8021eab331a4/content?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0Fi99SnM_9Dg39-zodRWeKdZu_YBFtNELRTYeESpytyexy4TKWiLdGswg_aem_PYVC8VxYT_xpfcVJatUP_g
- [81] *Kontrola svarů* [online]. In: . Elektronická učebnice [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1810?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0Yzi05Go0ahJrDhqpnlbhSKgD5yC8Q4aNm0a_87t6GeWcCZIs0Ygm3ZHc_aem_r8SfB08OL-XrQ-uSHCLPGQ#:~:text=Zkou%C5%A1ka%20%C3%A1mavosti%20svaru%20Zkou%C5%A1ka%20%C3%A1mavosti,b%C3%BDt%20dosa%C5%BEen%20%C3%BAhel%20ohybu%20120%20
- [82] ČSN EN ISO 5173 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem*. Česká agentura pro standardizaci, říjen 2023.
- [83] GRÜNEWALD, Jonas, Valentin BLICKLE, Matthias ALLENBERG-RABE, Philipp WAGENBLAST a Katrin WUDY. Flexible and highly dynamic beam shaping for Laser-Based Powder Bed Fusion of metals. *Science Direct* [online]. 6.9.2022, 6 [cit. 2024-07-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2022.08.124
- [84] T. ROEHLING, Tien, Rongpei SHI, Saad A. KHAIRALLAH, John D. ROEHLING, Gabe M. GUSS, Joseph T. MCKEOWN a Manyalibo +J. MATTHEWS. Controlling grain nucleation and morphology by laser beam shaping in metal additive manufacturing. *Science Direct* [online]. Livermone USA, 25.8.2022, 11 [cit. 2024-07-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.109071
- [85] *Fokusační optiky* [online]. In: . Trumpf [cit. 2024-07-12]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/obrabeci-optiky/fokusacni-optiky/

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Porovnání vlastností přirozeného světla a laseru [22] | 27 |
| Tabulka 2: Rozdělení laserových zdrojů dle vlnové délky paprsku [22] | 30 |
| Tabulka 3: Rozdělení laserů dle účinnosti [22] | 31 |
| Tabulka 4: Rozdělení aktivního prostředí [31] | 37 |
| Tabulka 5: Klasifikace jakosti svaru dle EN ISO 13191-1 [37] | 44 |
| Tabulka 6: Porovnání metalografických výbrusů svaru | 71 |
| Tabulka 7: Přehled základních rozměrů testovaných svarů | 72 |
| Tabulka 8: Porovnání metalografických výbrusů makro a mikro struktury | 75 |
| Tabulka 9: Porovnání metalografických výbrusů mikrostruktury | 76 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Schaefflerův konstituční diagram [6] | 18 |
| Obrázek 2: Schéma TIG svařování [12] | 22 |
| Obrázek 3: Schéma podoby svarů EBW [13] | 22 |
| Obrázek 4: Schéma EBW [18] | 23 |
| Obrázek 5: Schéma ultrazvukového svařování [19] | 24 |
| Obrázek 6: Vliv tvaru spoje na výsledný svar ultrazvukového svařování [19] | 24 |
| Obrázek 7: Vliv tvaru spoje na výsledný svar UT svařování [19] | 24 |
| Obrázek 8: Schéma LBW [23] | 25 |
| Obrázek 9: Schéma buzení a vzniku emise laserového paprsku [22]..... | 26 |
| Obrázek 10: Schéma tvorby laserového paprsku [24] | 28 |
| Obrázek 11: Schématické znázornění rezonanční kavity se dvěma zrcadly a emise laserového záření za pomoci excitace a stimulované emise v pevnolátkovém laseru [22] | 28 |
| Obrázek 12: Porovnání BPP dle typu laseru [22]..... | 29 |
| Obrázek 13: Schéma vlivu divergence laserového paprsku [22]..... | 29 |
| Obrázek 14: Kategorizace elektromag. záření na základě vlnové délky [26] | 29 |
| Obrázek 15: Závislost absorptivity na vlnové délce [22] | 30 |
| Obrázek 16: Modální rozložení pole v jednoduchém optickém vláknu, r je poloměr jádra, E je modální elektrické pole [29]..... | 32 |
| Obrázek 17: Vstup a výstup laserového paprsku do optického vlákna [22] | 32 |
| Obrázek 18: Schéma konstrukce pomalu průtokového plynového laseru [30] | 36 |
| Obrázek 19: Základní struktura optického vlákna vláknového laseru [30] | 38 |
| Obrázek 20: Schéma konstrukce YAG laseru [30] | 38 |
| Obrázek 21: Schéma diodového laseru [32]..... | 39 |
| Obrázek 22: Schéma konstrukce diskového laseru [30]..... | 40 |
| Obrázek 23: Porovnání velikosti TOO dle svařovací technologie [33] | 41 |
| Obrázek 24: Porovnání kondukčního (vlevo) a keyhole (vpravo) svařování [36]..... | 43 |
| Obrázek 25: Schéma svaru s podélnou trhlinou (101) [38]..... | 45 |
| Obrázek 26: Schéma svaru s příčnou trhlinou (102) [38]..... | 45 |
| Obrázek 27: Schéma svaru s kráterovou trhlinou (1045) [38] | 45 |
| Obrázek 28: Schéma svaru s pórem (2011) [38] | 45 |
| Obrázek 29: Schéma svaru se staženinou (202) [38] | 46 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 30: Schéma svaru se studeným spojem (4011) [38] | 46 |
| Obrázek 31: Schéma svaru s neprovařeného kořene (4021) [38]..... | 46 |
| Obrázek 32: Schéma svaru se zápallem (501) [42]..... | 47 |
| Obrázek 33: Schéma svaru s nadměrně propadlým kořenem (504) [42] | 47 |
| Obrázek 34: Schéma svaru s lineárním přesazením (507) [42]..... | 47 |
| Obrázek 35: Schéma svaru s proláklínou (5092) [37]..... | 48 |
| Obrázek 36: Schéma svaru s prohloubeným povrchem (511) [42]..... | 48 |
| Obrázek 37: Schéma svaru s rozstřikem (602) [42]..... | 48 |
| Obrázek 38: Metalografický výbrus MKK [8]..... | 49 |
| Obrázek 39: Postup kapilární zkoušky [49] | 51 |
| Obrázek 40: Výřez svaru pro příčnou tahovou zkoušku svaru [72]..... | 55 |
| Obrázek 41: Tvar zkušební tyče pro podélnou tahovou zkoušku svaru [71] | 55 |
| Obrázek 42: Možné umístění vrubů pro zkoušku rázové houževnatosti svaru [71]..... | 57 |
| Obrázek 43: Příčná zkouška svaru ohybem, povrch svaru namáhán tahem [80] | 58 |
| Obrázek 44: Schéma funkce akusticko – optického deflektoru (AOD) [83] | 59 |
| Obrázek 45: Optická sestava k tvorbě eliptického spotu (laserové skenování) [29] | 60 |
| Obrázek 46: ALE3D simulace jednotlivých stop vytvořených pomocí kruhového a eliptického spotu [84]..... | 61 |
| Obrázek 47: Schéma válcovací linky | 62 |
| Obrázek 48: Schéma svařovací sekce | 63 |
| Obrázek 49: Procesní hlava TRUMPF BEO D70 pro eliptický ARM spot..... | 64 |
| Obrázek 50: Připravené vzorky pro laboratorní analýzu | 67 |
| Obrázek 51: Zalisované vzorky v pryskyřici | 67 |
| Obrázek 52: Způsob upnutí trubky v trhacím stroji..... | 68 |
| Obrázek 53: Legenda měření rozměrů | 69 |
| Obrázek 54: Pozice měření mikrotvrlosti HV0,2 | 69 |
| Obrázek 55: Geometrie ARM kruhového svaru, hranice svaru vyznačena modře | 73 |
| Obrázek 56: Geometrie ARM eliptického svaru, hranice svaru vyznačena modře..... | 73 |
| Obrázek 57: Graf průběhu mikrotvrlosti HV0,2 | 73 |
| Obrázek 58: Přetržená trubka z tahové zkoušky | 77 |
| Obrázek 59: Graf tahové zkoušky | 78 |