



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

**Možnosti dosažení maximální rychlosti při procesu
svařování ocelových trubek a profilů laserem**

**Possibilities of achieving maximum speed in the process
of welding steel pipes and profiles with a laser**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Adam STEHLÍK

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stehlik** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **492616**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti dosažení maximální rychlosti při procesu svařování ocelových trubek a profilů laserem

Název bakalářské práce anglicky:

Possibilities of achieving maximum speed in the process of welding steel pipes and profiles with a laser

Pokyny pro vypracování:

- Popis problematiky laserového svařování, včetně popisu principu a rozdělení průmyslových laserů
- Analýza procesních parametrů a jejich vliv na rychlost svařování ve vazbě na kvalitu svarových spojů
- Návrh a provedení experimentu, včetně vyhodnocení kvality vytvořených zkušebních vzorků (včetně porovnání s konvenčním způsobem výroby)
- Vyhodnocení výsledků, včetně technicko-ekonomického porovnání
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Vrbová, M., Jelíková, H., Gavrilov, P. Úvod do laserové techniky, FJFI, ČVUT, Praha, 1998
- [2] Katayama, Seiji. Fundamentals and Details of Laser Welding, Springer Singapore, 2020
- [3] Steen, W.M., Mazumder, J. Laser Material Processing, 4th edition, Springer, 2010
- [4] Kannatey-Asibu Jr., E., Principles of Laser Materials Processing. Wiley, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci s názvem „*Možnosti dosažení maximální rychlosti při procesu svařování ocelových trubek a profilů laserem*“ vypracoval samostatně s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých literárních zdrojů v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

V Praze dne _____

Podpis autora

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi, Ph.D., IWE za vedení bakalářské práce, cenné připomínky a odborný dohled. Dále bych chtěl poděkovat společnosti *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* a jejím zaměstnancům za poskytnutí výrobní linky a pomoc při provádění experimentů.

Anotační list

Jméno autora:	Adam Stehlík
Název:	Možnosti dosažení maximální rychlosti při procesu svařování ocelových trubek a profilů laserem
Rok:	2022
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Bibliografické údaje:	Počet stran: 68 Počet obrázků: 57 Počet tabulek: 40
Klíčová slova:	Laser, laserové svařování, válcovací linka, korozivzdorné trubky
Anotace:	Práce se zabývá technologií laserového svařování v oblasti použití pro výrobu korozivzdorných trubek do EGR výměníků. Popisuje vhodné typy laserů použitelné pro tuto aplikaci a jejich princip fungování. Bakalářská práce zkoumá možné zvýšení produktivity výroby trubek při zachování dostatečné kvality výrobku.

Annotation sheet

Author: Adam Stehlík

Name: Possibilities of achieving maximum speed in the process of welding steel tubes and profiles with a laser

Year: 2022

Study program: Production and economics in engineering

Field of study: Technologies, materials and economics in engineering

Institute: Institute of mechanical engineering

Supervisor: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

Bibliographic data: Amount of pages: 68
Amount of pictures: 57
Amount of charts: 40

Keywords: Laser, laser welding, forming line, stainless steel tubes

Annotation: The thesis focuses on laser welding technology in the application of producing stainless steel tubes for EGR heat exchangers. It describes types of lasers suitable for this application and their principles of operation. The thesis examines potential gain in productivity of tubes while preserving sufficient quality of the product.

Obsah

1. Úvod	9
2. Konvenční metody svařování	10
2.1. Specifikace základního materiálu a řešené součásti	10
2.2. Svařování obalenou elektrodou – MMA	12
2.2.1. Princip metody MMA	12
2.2.2. Výhody metody MMA	13
2.2.3. Nevýhody metody MMA	13
2.2.4. Možnosti zvýšení produktivity svařování metody MMA.....	13
2.3. Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře tavící se elektrodou – MIG/MAG....	13
2.3.1. Princip metody MIG/MAG.....	14
2.3.2. Výhody metody MIG/MAG.....	14
2.3.3. Nevýhody metody MIG/MAG.....	15
2.3.4. Možnosti zvýšení produktivity svařování metody MIG/MAG	15
2.4. Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře inertních plynů netavící se elektrodou – TIG	15
2.4.1. Princip metody TIG.....	16
2.4.2. Výhody metody TIG.....	16
2.4.3. Nevýhody metody TIG.....	16
2.4.4. Možnosti zvýšení svařovací produktivity metody TIG.....	16
2.5. Automatické svařování pod tavidlem – SAW	17
2.5.1. Princip metody SAW.....	17
2.5.2. Výhody metody SAW.....	18
2.5.3. Nevýhody metody SAW.....	18
2.5.4. Možnosti zvýšení svařovací produktivity metody SAW.....	18
3. Speciální metody tavného svařování	18
3.1. Plazmové svařování – PAW	19
3.1.1. Princip metody PAW	19
3.1.2. Výhody metody PAW	20
3.1.3. Nevýhody metody PAW	20
3.2. Elektronové svařování – EBW	20
3.2.1. Princip metody EBW.....	21
3.2.2. Výhody metody EBW.....	21
3.2.3. Nevýhody metody EBW.....	21
4. Laserové svařování	22

4.1. Výhody svařování laserem	22
4.2. Nevýhody svařování laserem	22
4.3. Fyzikální princip laseru	23
5. Rozdělení průmyslových laserů pro svařování	24
5.1. Pevnolátkové lasery	24
5.1.1. Diodové lasery	24
5.1.2. Tyčové Nd:YAG lasery	25
5.1.3. Diskové lasery	26
5.1.4. Vlákenné lasery	27
5.2. Plynové lasery	27
5.2.1. CO ₂ lasery	27
6. Možné vady u svarových spojů	29
6.1. Trhliny	29
6.2. Dutiny	29
6.3. Pevné vměstky	29
6.4. Studené spoje a neprůvary	30
6.5. Vady tvaru a rozměru	30
6.6. Různé vady	31
7. Popis výrobní linky	32
7.1. Pozice ve výkresu	33
7.2. Současný stav výroby	36
7.2.1. Parametry výrobní linky	36
7.2.2. Popis aktuálních kontrol kvality svarového spoje a parametrů výrobku	36
7.3. Zvýšení rychlosti na 7,2 m/min	43
7.4. Zvýšení rychlosti na 7,6 m/min	46
7.5. Zvýšení rychlosti na 7,8 m/min	49
7.6. Zvýšení rychlosti na 8 m/min	52
8. Snímky makrostruktury	53
9. Měření mikrotvrdosti svarových spojů na vytvořených vzorcích	57
10. Technicko-ekonomické zhodnocení výsledků	59
11. Závěr	61
Použité literární zdroje	62
Seznam obrázků	65
Seznam tabulek	67
Seznam zkratk	68

1. Úvod

Tavné svařování jako strojírenská technologie je spojování dvou nebo více materiálů stejného nebo podobného složení tím způsobem, že se materiály lokálně ohřejí až na teplotu tavení a slitím a ztuhnutím roztavených ploch se nerozebíratelně spojí [1].

Laserové svařování patří k modernějším metodám tavného svařování. Touto technologií se spojují kovové i nekovové materiály. Je to metoda bezdotyková, která využívá laserový paprsek, jenž je soustředěn na povrch součásti, kde dochází k roztavení a promíchání materiálů podél místa spojení a následným ochlazením se vytvoří svar [2].

První laser sestrojil fyzik Theodor Maiman v roce 1960 v Kalifornii použitím krystalu syntetického rubínu. To umožnilo generování velmi úzkého a intenzivního paprsku světla. Tehdy ho popsal jako "řešení hledající problém" [3]. Od tohoto pokusu uplynulo již přes 60 let a za tu dobu se laserového svařování vyvinulo na velice sofistikovanou úroveň. Dnes se hojně využívá v mnoha průmyslových oblastech z důvodu velké produktivity, přesnosti, kvality svaru, a zejména dobré kontroly nad množstvím vneseného tepla do materiálu atd., a to i při vysokých svařovacích rychlostech.

Bakalářská práce se zabývá technologií laserového svařování, konkrétně v aplikaci svařování ocelových trubek na výrobní lince společnosti *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje*. Firma podniká v automobilovém průmyslu a profilované trubky vyrábí do tepelných EGR výměníků, které jsou součástí některých motorů vozidel značky Volkswagen.

Bakalářská práce se skládá z teoretické části, kde je popsáno použití konvenčních metod pro svařování ocelových trubek a profilů, konkrétně z materiálu značeného dle normy EN 10027-2 jako 1.4307 (který je používán u průmyslového partnera), včetně zdůraznění jejich výhod a nevýhod. Následně jsou popsány i speciální tavné metody svařování, které se dají použít pro danou aplikaci, a je jim věnována pozornost zejména z hlediska produktivity a rychlosti. Dále se práce podrobněji zabývá laserovým svařováním, které je hlavním předmětem zájmu této bakalářské práce.

V experimentální části práce je zkoumáno, zda na základě zvýšení rychlosti linky a úpravě jejich parametrů (včetně procesu laserového svařování) lze trubky vyrábět s větší produktivitou, než je tomu v současné době. To znamená maximálně zvýšit výrobní rychlost a efektivitu procesu. Vyrobené vzorky trubek byly kontrolovány a vyhodnoceny na základě kvalitativních podmínek zavedenými kontrolami společnosti *Attl a spol s.r.o. Továrna na stroje*, dále byla realizována zkouška makrostruktury svarového spoje a ověřeny změny mechanických vlastností zkouškou mikrotvrdosti.

V závěru práce následuje vyhodnocení zjištěných výsledků výzkumu a jejich technicko-ekonomické vyhodnocení.

2. Konvenční metody svařování

Tato kapitola je věnována zejména popisu nepoužívanějších metod, které se dají použít ke svařování korozivzdorné oceli 1.4307 (ta je blíže popsána v kapitole 2.1.). Tento materiál používá firma *Attl a spol. Továrna na stroje* ve výrobě, které se věnuje praktická část bakalářské práce. Je zde zahrnut teoretický popis principu vybraných svařovacích metod, které lze využít pro zpracování uvedeného materiálu, včetně možností zvýšení produktivity, s využitím robotizace a automatizace.

2.1. Specifikace základního materiálu a řešené součásti

Jde o legovanou, ušlechtilou, austenitickou, korozivzdornou ocel s nízkým obsahem uhlíku (základní chemické složení je uvedeno v tabulce 1) značenou dle normy EN 10027-1 jako X2CrNi1819 (případně podle normy EN 10027-2 jako 1.4307). Americký ekvivalent je AISI 304 L. Materiál se vyznačuje vynikající odolností vůči korozi. V případě dodržení specifických podmínek pro svařování korozivzdorných ocelí je materiál dobře svařitelný i bez přídavného kovu a jednoduše obrobitelný. Ocel je i po svařování odolná proti mezikrystalické korozi. Vzhledem k náchylnosti na přehřátí se obvykle svařuje bez přehřevu a bez tepelného zpracování po svařovacím procesu [4].

Zmíněná ocel by při nedodržení správných postupů a podmínek mohla být náchylná například na tvorbu trhlin za tepla, vznik σ fáze (zkřehnutí) anebo na precipitaci karbidů Cr (MKK – Mezikrystalická koroze). Vznik σ fáze, na které jsou náchylné oceli se zvýšením obsahem Cr, je tvrdá a křehká intermetalická sloučenina vznikající v intervalu teplot 500 až 800 °C místním přelegováním Cr. Aby se zabránilo tvoření těchto nežádoucích jevů, je důležité dodržovat správné postupy a doporučení [5].

Způsoby eliminace nežádoucích jevů při svařování austenitických ocelí

- Limitace vneseného tepla do materiálu – využití metody laserové svařování toto dobře umožňuje
- Použití vhodných WPS
- Dodržení zásad pro svařování korozivzdorných ocelí (zejména z hlediska ochrany svaru a čistoty pracovního prostředí)
- Při svařování plechů malých tloušťek – zkoumaným předmětem praktické části práce je oválná podélně svařovaná trubka s tloušťkou materiálu 0,3 mm – vhodné intenzivní chlazení (např. pomocí měděných podložek svařovacího přípravku)

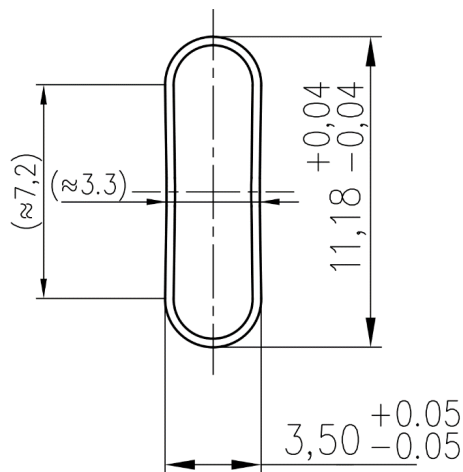
Tabulka 1 - Chemické složení základního materiálu – oceli 1.4307 [4]

Chemický prvek	Hodnota (% hmot.)
C – Uhlík	≤ 0,03
Si – Křemík	1,0
Mn – Mangan	≤ 2,0
Cr – Chrom	17,5 – 19,5
Ni – Nikl	8,0 – 10,0

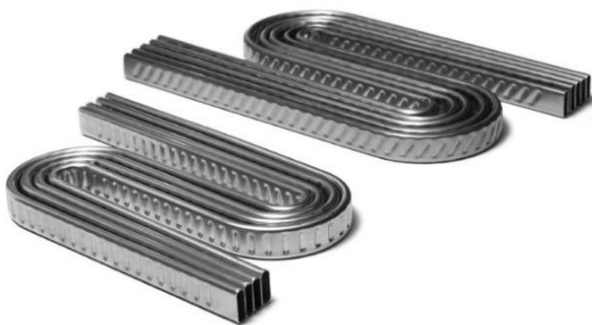
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti materiálu [6]

Mechanická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Tvrдость HB	195	-
Mez kluzu	170	N/mm ²
Pevnost v tahu	450-680	N/mm ²
Tažnost	51	%

Díl, na kterém bude výzkum v praktické části bakalářské práce prováděn, je podélně svařovaná ocelová korozivzdorná trubka o délce $457,8 \pm 0,1$ mm (detailnější rozměry jsou specifikovány na obrázku 1). Tyto trubky dále procházejí dalšími výrobními operacemi, které zajišťují požadovaný ohyb a „dimplování“ jejich povrchu. V sérii po čtyřech je společnost *Attla spol. s.r.o. Továrna na stroje* prodává zákazníkovi, jenž trubičky montuje do tzv. EGR výměníků (viz obrázek 3), což je výměník tepla umístěný v motorovém prostoru automobilu. Jeho funkcí je recyklovat část výfukových plynů a znovu je zavádět do sacího potrubí motoru. Tato směs vede k nižší teplotě spalování a menšímu přebytku kyslíku, což má za následek snížení emisí. Tyto výměníky tepla využívá společnost Volkswagen AG na příklad při výrobě modelu Volkswagen Crafter.



Obrázek 1 – Specifikace rozměrů profilu trubky



Obrázek 2 - Podélně svařovaná korozivzdorná trubka



Obrázek 3 - EGR výměník

2.2. Svařování obalenou elektrodou – MMA

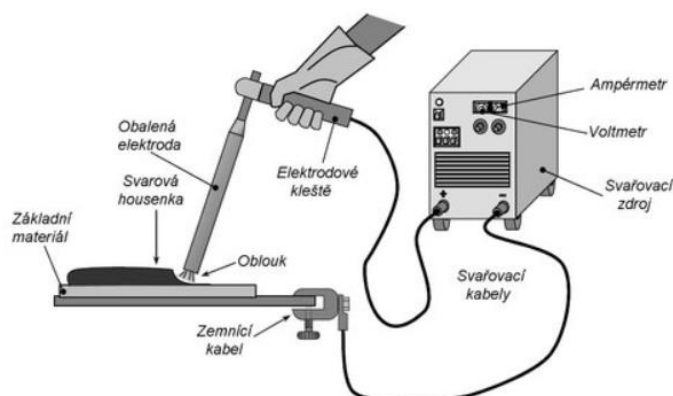
Metoda se značí dle normy EN ISO 4063 číselným kódem 111. Z důvodu jednoduchosti a finanční nenáročnosti jde o nejuniverzálnější a nejrozšířenější svařovací metodu, i když je stále více nahrazována produktivnějšími procesy z toho důvodu, že se jedná čistě o ruční metodu svařování. Bývá často nahrazována zejména konvenčními metodami obloukového svařování v ochranných atmosférách, případně speciálními metodami. Obvykle se používá v případech menších sérií výroby a montážních pracích [7].

Tabulka 3 - Charakteristika a rozsah použití MMA [7]

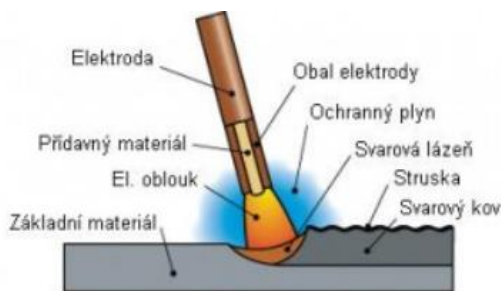
Svařovací polohy	Všechny polohy – omezení pouze druhem elektrody
Druh základního materiálu	Nelegované, nízkolegované, vysokolegované oceli, Ni, Cu, Al a jejich slitin
Tloušťka základního materiálu	2 až 100 mm
Svařovací proud	50 až 450 A
Napětí na oblouku	15 až 40 V
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný, střídavý
Průměr elektrody	Nejčastěji v rozmezí 2 až 6,3 mm
Statická charakteristika svařovacího zdroje	Strmá

2.2.1. Princip metody MMA

Elektrický oblouk se zapaluje v momentě dotyku obalené elektrody a základního materiálu (pokud je uzavřen svařovací elektrický obvod a zapnut svařovací zdroj). Při vzniku oblouku dochází k vytvoření svarové lázně na povrchu základního materiálu (viz obrázek 4). Tavení obalu elektrody způsobuje vytvoření malého množství ochranné atmosféry v těsné blízkosti elektrického oblouku a především vytvoření strusky na povrchu svarové lázně, která při procesu chladnutí chrání svar před přístupem plynů z okolní vzdušné atmosféry [8]. Z principu této metody je patrné, že lze svařování obalenou elektrodou částečně mechanizovat, nelze ji ale využít pro automatizovanou sériovou výrobu.



Obrázek 4 - Schéma svařování metodou MMA [5]



Obrázek 5 – Principiální schéma hoření elektrického oblouku u metody MMA [9]

2.2.2. Výhody metody MMA

- Malé náklady na provoz, nevyžaduje externí plynové hospodářství
- Univerzální použití, dobrá mobilita, menší náchylnost na okolní podmínky – použití v montážních podmínkách
- Rozsáhlý sortiment obalených elektrod – široké použití z hlediska základních materiálu
- Možnost svařování v polohách

2.2.3. Nevýhody metody MMA

- Malá produktivita – nutnost výměny elektrod – materiálové ztráty
- Nutnost odstranění strusky – zvýšení vedlejších časů výroby
- Nezpůsobilost využití v automatizaci a robotizaci, protože jde o ruční metodu svařování, kde je nezbytná kvalifikovaná pracovní síla – velký vliv zručnosti svářeče

2.2.4. Možnosti zvýšení produktivity svařování metody MMA

- Použití přípravků, pojezdů a polohovadel → snížení pracnosti (mechanizace procesu)
- Použití elektrod s kyselým obalem a svařování střídavým proudem → snížení jednotkového času o 20 až 28 %, nicméně dochází ke snížení kvality svařového kovu [7]
- Použití hlubokozávarových elektrod → možnost svařování bez nutnosti přípravy úkosů. V praxi se dnes tyto elektrody používají velmi málo
- Použití lehkého přenosného zdroje proudu – vyšší mobilita

Pro řešený výrobek není tato metoda vhodná z důvodu svařování malých tlouštěk základního materiálu.

2.3. Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře tavící se elektrodou – MIG/MAG

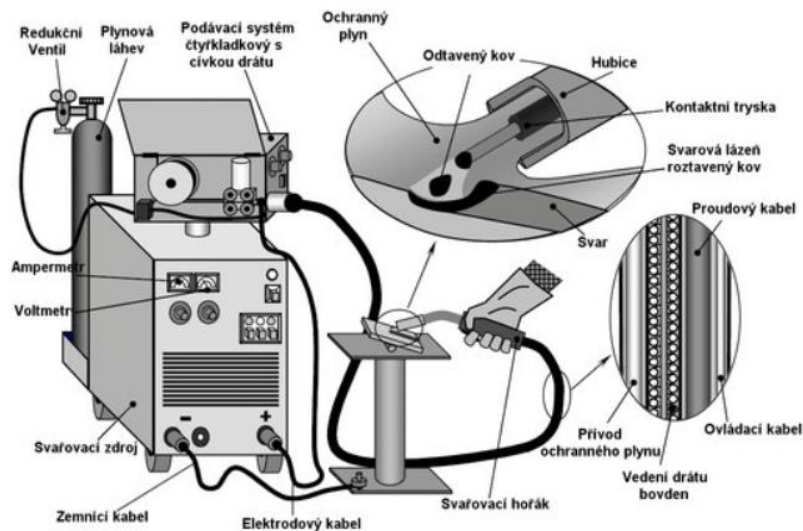
Označení metody MIG (Metal Inert Gas) (dle normy EN ISO 4063 – 131) nebo MAG (Metal Active Gas) (dle normy EN ISO 4063 – 135) závisí na tom, zda se při svařování používá aktivních plynů (CO₂ nebo dnes především směsné plyny), tedy metoda MAG, anebo inertních plynů (argon, helium), tedy metoda MIG. Elektrický oblouk hoří mezi svařovacím drátem (který tvoří tavící se elektrodu) a základním materiálem [7]. Jde o poloautomatické svařování, protože drát je do místa svařování přiváděn motorizovaným pohonem pomocí automatického kladkového podavače. Metodu lze však jednoduše plně robotizovat a automatizovat.

Tabulka 4 - Charakteristika a rozsah použití metody MIG/MAG [7]

Svařovací polohy	Všechny polohy v závislosti na svařovacích parametrech
Druh základního materiálu	MAG: nelegované a nízkolegované oceli MIG: vysokolegované oceli, slitiny neželezných kovů např.: Al, Ni, Cu
Tloušťka základního materiálu	0,8 až 40 mm
Přenos přídavného materiálu	Zkratový: $I_S = 40$ až 190 A Sprchový: $I_S = 180$ až 500 A
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný s nepřímou polaritou, zřídka střídavý
Průměr svařovacího drátu	0,8 až 2,6 mm, nejčastěji však od 0,8 do 1,4 mm

2.3.1. Princip metody MIG/MAG

Metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu využívá teplo hořícího elektrického oblouku mezi kontinuálně dodávaným svařovacím drátem (elektrodou) a základním materiálem. Roztavený drát a svarová lázeň je chráněna ochranným plynem dle metody MIG nebo MAG. Ochranná atmosféra je dodávána z externího zdroje, např. z tlakové láhve nebo centrálním rozvodem plynu [10].



2.3.2. Výhody metody MIG/MAG

- Vysoká svařovací rychlost
- Není třeba měnit elektrody (jsou dodávány v cívkách nebo velkokapacitních zásobnících)
- Svařování ve všech polohách
- Nevzniká struska, ale pouze produkty dezoxidace (oxid křemičitý apod.) – lze jednoduše odstranit např. ocelovým kartáčem
- Elektrický oblouk i svarová lázeň jsou dobře viditelné

2.3.3. Nevýhody metody MIG/MAG

- Vyšší cena oproti metodě MMA
- Větší nároky na údržbu
- Nutnost hospodaření s plynem – zvýšené bezpečnostní nároky

2.3.4. Možnosti zvýšení produktivity svařování metody MIG/MAG

Aby se zvýšila produktivita svařování, používají se k práci automaty, poloautomaty a průmysloví roboti. Možnost tandemového nebo twin (dvoudrátového) svařování, což vede ke zvětšení množství odtaveného kovu. Dobré operativní vlastnosti (možnost svařovat ve všech polohách) a možnost rychlé změny svařovacích parametrů vytvářejí předpoklady pro použití těchto metod v procesu automatizovaného svařování [7]. Z hlediska řešené aplikace je obtížné svařování velmi malých tlouštěk, bylo by však zřejmě možné aplikovat modifikované procesy MIG/MAG, které minimalizují vnesené teplo – např. metodu CMT (Cold Metal Transfer), což je nízkoenergetický proces přenosu kapek, kde se digitálně kontroluje krátký oblouk a vratný pohyb drátu [11].

2.4. Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře inertních plynů netavící se elektrodou – TIG

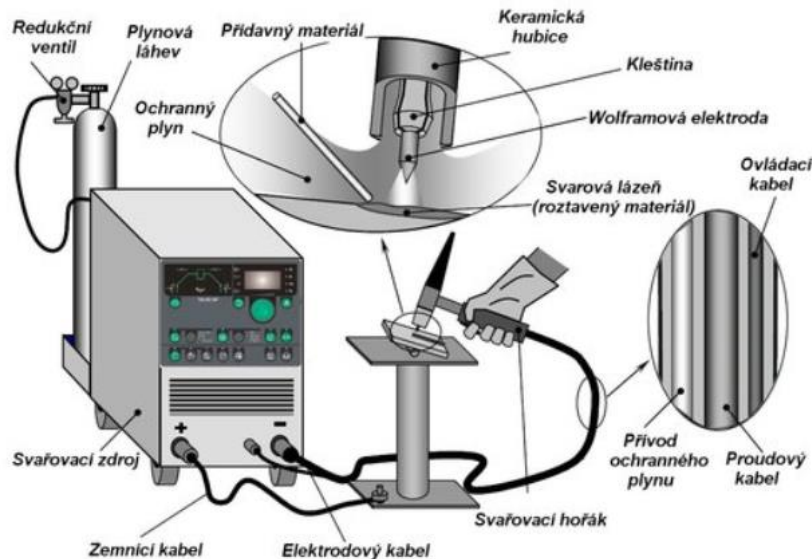
Jde o univerzální svařovací metodu, značenou dle normy EN ISO 4063 – 141, která je rozlišitelná od jiných metod hlavně tím, že wolframová elektroda, která má vysokou teplotní stabilitu pro okrajové teploty el. oblouku, se netaví a do místa svaru se mechanicky nebo ručně dopravuje přídatný materiál ve formě drátu. Nicméně u materiálů o malých tloušťkách lze svařovat bez přídatného materiálu [12]. TIG se obvykle využívá pro náročnější svary v jaderné, kosmické a letecké technice.

Tabulka 5 - Charakteristika a rozsah použití TIG [7]

Svařovací polohy	Všechny polohy
Druh základního materiálu	Všechny druhy ocelí, včetně legovaných, neželezné kovy a jejich slitiny např.: Ni, Cu, Al, Ti, Ag, Zr
Tloušťka základního materiálu	0,8 až 40 mm (doporučená je cca od 6 do 10 mm)
Svařovací proud	10 až 400 A
Druh svařovacího proudu	Střídavý pro Al, Mg a jeho slitiny, stejnosměrný pro ostatní materiály
Průměr elektrody	1 až 8 mm
Chlazení hořáku	Do 150 A plynem, nad 150 A kapalinou (vodou)
Statická charakteristika zdroje	Strmě klesající
Zapalování oblouku	Vysokofrekvenčním výbojem (HF)
Ochranné plyny	Argon, helium a jejich směsi

2.4.1. Princip metody TIG

Ochranný inertní plyn (argon nebo helium) je přiváděn podél osy netavící se wolframové elektrody keramickou hubicí do místa svaru, kde chrání svarovou lázeň i vlastní elektrodu. Oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem, jeho velikost je regulovatelná napěťovou regulací. Přídavný drát je dodáván do oblouku podávacím mechanismem anebo ručně. Toto uspořádání umožňuje širokou volbu svařovacích parametrů [7].



Obrázek 7 – Schéma svařování metodou TIG [12]

2.4.2. Výhody metody TIG

- Vysoká kontrola nad svarovou lázní – preciznost
- Dobrá ochrana svarové lázně před okolní vzdušnou atmosférou
- Velká teplota elektrického oblouku – široká hloubka závaru
- Dobré operativní vlastnosti – možnost svařovat ve všech polohách
- Možnost svařování materiálů malých tlouštěk (využití tzv. mikrotigového svařování s velmi nízkými svařovacími proudy)

2.4.3. Nevýhody metody TIG

- Vyšší pořizovací náklady oproti metodě MMA
- Při ručním svařování malá produktivita
- Větší náročnost na obsluhu

2.4.4. Možnosti zvýšení svařovací produktivity metody TIG

Princip svařování netavící se elektrodou je z hlediska produktivity obtížněji mechanizovatelný a automatizovatelný. Možným řešením je například využití automatického podávání přídavného materiálu při ručním způsobu svařování, mechanického posuvu svařovacího hořáku, svařování s přidáváním horkého drátu, svařování do úzkého úkosu anebo orbitálního svařování trubek [13].

2.5. Automatické svařování pod tavidlem – SAW

Technologie SAW (Submerged Arc Welding značená dle normy EN ISO 4063 – 121) patří mezi nejproduktivnější a nejžakostnější metody svařování kovů. Svařování pod tavidlem je ve své podstatě svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou. Elektrický oblouk hoří mezi základním svařovaným materiálem a odtavující se elektrodou, která je tvořena ve formě drátu navinutého na cívce a pomocí elektromotorem poháněných kladek je posouvána do hořícího oblouku.

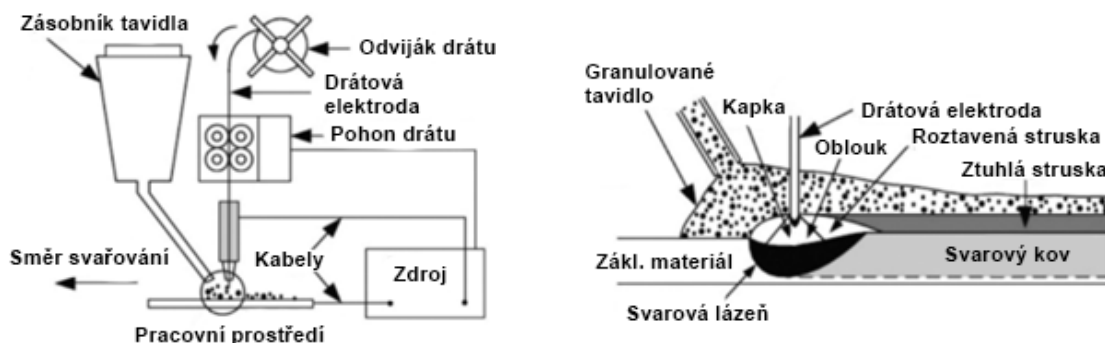
Doposud se tato metoda nijak neliší od svařovací metody MIG/MAG, zásadním rozdílem ale je ochrana svarové lázně před oxidací, tedy přístupem vzduchu. Zatímco u MIG/MAG je ochrana el. oblouku zajištěna ochranným plynem, u svařování pod tavidlem zajišťuje ochranu práškové tavidlo, které el. oblouk intenzivně chrání před okolní vzdušnou atmosférou. Svarová lázeň je během svařování neustále zaspávána vrstvou tavidla a pod touto vrstvou dochází k hoření elektrického oblouku. Oblouk tedy vůbec není viditelný, je schován pod vrstvou tavidla a z toho pramení minimální emise škodlivých dýmů a záření [14].

Tabulka 6 - Charakteristika a rozsah použití [7]

Svařovací polohy	PA nebo PB
Druh základního materiálu	Všechny druhy konstrukčních ocelí, vysokolegované slitiny Ni, Al, Cu
Tloušťka základního materiálu	5 až 100 mm (může být i více)
Svařovací proud	200 až 2000 A
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný, střídavý
Napětí na oblouku	1 až 8 mm
Svařovací rychlost	15 až 120 m · h ⁻¹
Průměr přídatného drátu	2 až 8 mm

2.5.1. Princip metody SAW

Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou (holý kovový drát) a základním materiálem v dutině, která se vytvoří pod roztavenou vrstvou tavidla, jež před účinky okolní atmosféry perfektně chrání svarovou lázeň i celý oblouk. Podávání tavidla, posuv drátu i dodržení parametrů zajišťuje řídicí jednotka [7].



Obrázek 8 - Schéma svařování metodou SAW [15]

2.5.2. Výhody metody SAW

- Vysoká svařovací rychlost
- Velká kvalita svaru – hluboký závar, není třeba opracování
- Automatizovaný proces (ruční režim se nepoužívá)
- Není třeba chránit zrak svářečskou kuklou, svar je kryt neroztaveným tavidlem, operátor ale nemá o svarové lázni přehled
- Malé deformace a vnitřní napětí svarových spojů

2.5.3. Nevýhody metody SAW

- Vyšší pořizovací náklady
- Zvýšené nároky na obsluhu – jiný systém školení. U této metody nepracuje svářeč, ale svářečský operátor. Nicméně samotná práce může být jednodušší než například u ručního TIG svařování
- Svařování pouze v polohách PA a PB
- Nutnost polohování svařence
- Svařování pouze větších tloušťek

2.5.4. Možnosti zvýšení svařovací produktivity metody SAW

SAW zvyšuje produktivitu práce 2 až 5krát oproti ručnímu svařování a zajišťuje vyšší kvalitu svarového spoje. Ovšem je zapotřebí správného zvolení svařovacích parametrů. Produktivitu lze zvýšit použitím více drátových elektrod (tandem, twin). Multidrátové technologie mohou mít až 6 elektrod v jedné svarové lázni – velmi to zvýší výkon odtavení i vlastní rychlost svařování. Důležitou roli hraje čistota svarových ploch, chemické složení základního materiálu a vybavenost pracoviště polohovadly a přípravky. Svařovací automaty samy zapalují a udržují stabilní oblouk, současně zajišťují optimální pohyb přídatného materiálu vůči dílu [7]. Z hlediska zkoumaného výrobku je tato metoda prakticky nevyužitelná z důvodu svařování malých tloušťek základního materiálu.

3. Speciální metody tavného svařování

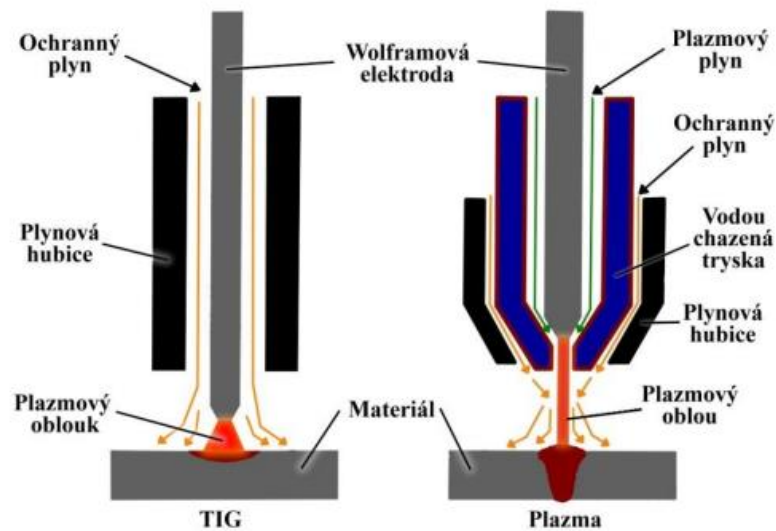
V dnešní době z důvodu velkého vývoje průmyslových oborů a využívání nových materiálů se už člověk neobejde bez nutnosti spojovat různorodé, obtížně svařitelné materiály, které mohou mít i rozdílnou tloušťku. V tomto případě není vhodné použití již uvedených konvenčních metod, ale spíše speciálních technologií, které se vyznačují vysokou koncentrací tepelné energie na jednotku plochy. Charakteristickým znakem těchto metod je podstatné snížení spotřeby tepelné energie na jednotkovou délku svaru, kterého se dosahuje vysokou hustotou výkonu energie v dopadové ploše [16]. Metody vhodné pro tyto aplikace jsou rozdělené na plazmové, elektronové a laserové svařování, kterému se věnuje podrobněji čtvrtá kapitola bakalářské práce, neboť právě tento způsob používá firma *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* ke svařování profilovaných trubek a je primárním předmětem bakalářské práce v praktické části.

3.1. Plazmové svařování – PAW

Značení této metody dle normy EN ISO 4063 je 15. Plazma se často označuje jako čtvrté skupenství hmoty, které se na Zemi vyskytuje jen zřídka, ovšem ve vesmíru tvoří asi 90% veškeré hmoty. Fyzikální pojem plazma, která se používá při technologiích svařování, poprvé definoval v roce 1923 Irving Langmuir jako speciální stav plynů, který vzniká ionizací, což je uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů atomu. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Ionizované jádro atomu – iont se zbývajícími elektrony má převládající kladný náboj. Navenek se však plazma chová jako elektricky neutrální. Na ionizaci plynů je potřeba značná energie [16] [17].

3.1.1. Princip metody PAW

Vlastní princip plazmového svařování je odvozený od svařování metodou TIG, kde keramická hubice je nahrazena intenzivně chlazenou kovovou tryskou. Pro zapálení pomocného oblouku se používá VF ionizátor připojený ke kovové trysce. To znamená, že není vodivě spojený se základním materiálem, tudíž jde o nezávislé zapojení, nemá ale dostatečný výkon k natavení materiálu. Pomocný (pilotní) oblouk vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního oblouku i na relativně dlouhou vzdálenost, následně dochází k přepnutí do závislého zapojení a zvýšení parametrů. Závislé zapojení se používá především u svařování, navařování a řezání. Princip svařování plazmou je tedy založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Plazmový hořák má zúženou výstupní trysku, která přispívá k fokusaci plazmového oblouku. Kromě fokusace oblouku se plazmový oblouk od el. oblouku odlišuje ještě použitím plazmového plynu (který zvyšuje stupeň ionizace – a tím i teplotu) [16].



Obrázek 9 - Rozdíl mezi metodou svařování TIG a svařování plazmatem (PAW)

Tabulka 7 - Přibližné průměrné teploty plazmatu při použití různých typů plazmových plynů [16]

	Teplota (K)
Dusíková plazma	do 9000
Vodíková plazma	10 000
Argonová plazma	16 000
Heliová plazma	20 000
Plazma stabilizovaná vodou	až 35 000

3.1.2. Výhody metody PAW

- Svařování bez podložení kořene
- Vyšší rychlost oproti svařovacím metodám MIG a TIG
- Malá tepelně ovlivněná oblast, menší deformace
- Menší převýšení svaru a tím i snížení pracnosti následného opracování svaru
- Výborná kvalita svaru a estetický vzhled
- Snížení pracnosti přípravy svarových ploch
- Možnost svařování velmi malých tlouštěk materiálu (mikroplazmové svařování)
- Možnost použití metody svařování průchozím paprskem – Keyholing (bez použití přídavného materiálu) [18]

3.1.3. Nevýhody metody PAW

- Nutnost přesného ustavení pozice elektrody v hořáku a geometrie elektrody
- U metody svařování průchozím paprskem omezená tloušťka materiálu – 8 až 10 mm
- Nutnost intenzivního vodního chlazení
- Vysoké vnesené teplo – větší tepelně ovlivněná oblast

3.2. Elektronové svařování – EBW

EBW (Electron Beam Welding) je značeno dle normy EN ISO 4063 kódem 51 a jde o elektronové svařování nebo svařování svazkem elektronů, což je proces, který využívá fokusovaného svazku elektronů o vysoké energii generovanou žhavenou katodou elektronového děla, které jsou směřovány na svařovaný spoj.

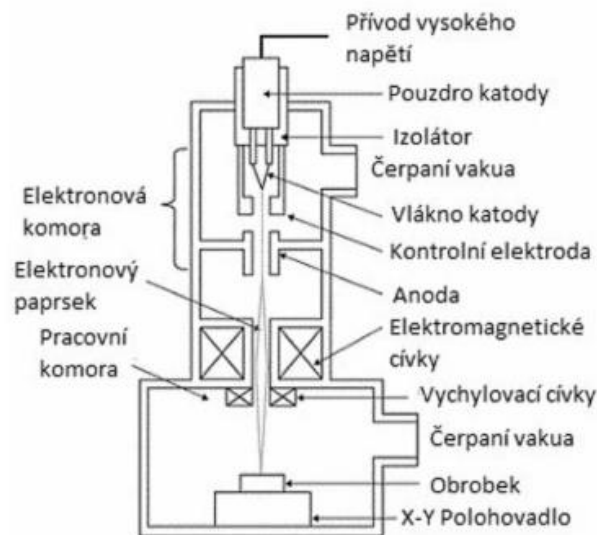
První aplikaci svařování fokusovaným svazkem elektronů uskutečnil J.A. Stohr ve francouzské atomové komisi CEA v roce 1954 až 1957 a dnes je uvedená metoda svařování rozšířená ve všech průmyslově vyspělých státech světa včetně ČR [16].

Využití svařování elektronovým svazkem v průmyslové výrobě zasahuje do mnoha oblastí ve strojírenství, např. spojování kovových i nekovových materiálů, navařování, povrchového zpracování a legování povrchu materiálů, PVD povlakování, a dnes i do moderního „3D tisku“ kovových materiálů. Ohřev je tak úzce lokální a většina sestavy zůstává chladná a stabilní. Díky tomu je dosaženo úzkého svaru s minimální tepelně ovlivněnou oblastí [19].

3.2.1. Princip metody EBW

Elektrony jako jedny ze základních částic hmoty nesou záporný náboj a mají extrémně malou hmotnost. Pro potřeby svařování se vysokým napětím urychlí na přibližně 30 až 70 % rychlosti světla, čímž se vytvoří energie dostatečná na roztavení svařovaných materiálů [19].

Vlastní zdroj elektronů je válcová vakuovaná nádoba na jednom konci opatřená přímo nebo nepřímo žhavenou emisí elektrodou a na druhém konci vybavená oddělovacím uzávěrem, který je kombinovaný s hranolem pozorovací optiky. Zdroj elektronů bývá nazýván elektronové dělo nebo elektronová tryska a je pomocí rotační a difúzní vývěvy čerpán na vysoké vakuum až $5 \cdot 10^{-4}$ Pa. Vakuum je nezbytné z důvodu zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolace katody, zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami a zamezení srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrzdění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru. Vlastní svařování probíhá v pracovní vakuové komoře, kde svařovací pohyb je zajištěn programovatelným polohovadlem [16].



Obrázek 10 - Princip elektronového svařování [19]

3.2.2. Výhody metody EBW

- Úzká tavná oblast a malá tepelně ovlivněná oblast
- Velká penetrace svaru (až 300 mm)
- Minimální deformace
- Malý přívod tepla do svařovaných dílů
- Díky ochraně vakuem možnost zpracování i obtížně svažitelných materiálů

3.2.3. Nevýhody metody EBW

- Nutnost vytváření vakua
- Velmi drahé zařízení (v jednotkách desítek mil. Kč) - vyšší investiční náklady
- Omezení velikosti svařovaných dílů velikostí vakuové komory
- Nutnost profesionálního školení operátora

4. Laserové svařování

Arthur Schawlow and Charles Towns poprvé publikoval koncept laseru v roce 1958 a o dva roky později vynalezl první pracovní rubínový laser americký inženýr Theodor Harold Maiman, který je považován za vynálezce prvního funkčního laseru. Ihned poté byly zaznamenány první laboratorní pokusy o svařování pomocí laseru. Výrazněji se však aplikace laserového svařování začaly aplikovat po vynálezu Nd:YAG laseru v roce 1964. Laserové svařování zaznamenalo v posledních dekádách z hlediska rozvoje a zvyšování výkonů převážně pevnolátkových vláknových laserů velký pokrok. Zčásti z důvodu vývoje výkonnějších a nových typů laserů, ale také kvůli širšímu používání nových moderních materiálů, které jsou jinými metodami obtížně svařitelné [20] [21].

Slovo „LASER“ vzniklo z počátečních písmen Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V překladu to znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření, a to v podstatě vysvětluje princip vzniku laserového záření [20].

Tabulka 8 - Typy a charakteristika laserů pro svařování [22] [23]

Typ laseru	Vlnová délka	Aktivní prostředí	Průměrný výkon
Diodové lasery	0,8 - 1,1 μm	InGaAsP (pevný)	10 kW (stack-type max.), 15 kW (fiber-delivery max.)
Nd:YAG lasery	1,06 μm	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (pevný)	100 kW (maximum)
Diskové lasery	1,03 μm	Yb_3+YAG nebo YVO_4 (pevný)	16 kW (cascade-type max.)
Vláknové lasery	1,07 μm	Yb_3+SiO_2 (pevný)	100 kW (fiber-coupling max.)
CO_2 lasery	10,6 μm	CO_2 - N_2 - He (smíšený plyn)	50 kW (maximum), 1-15 kW (normální)

4.1. Výhody svařování laserem

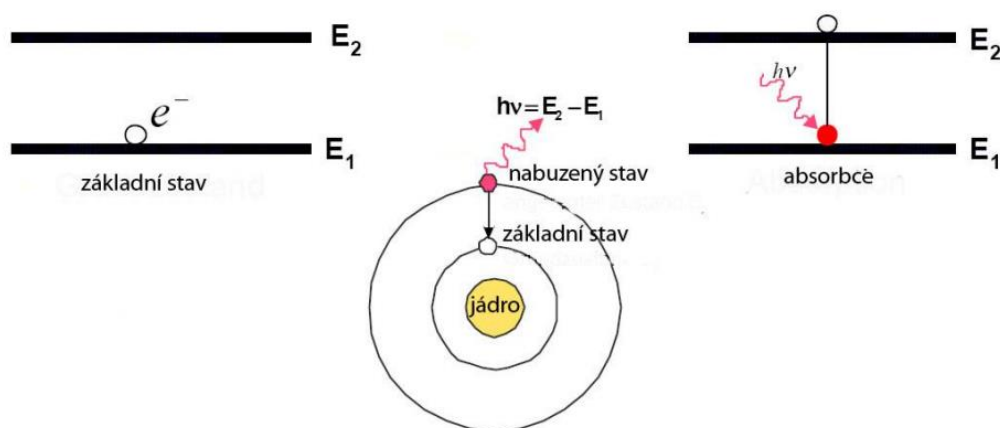
- Kvalita svaru a svarového spoje
- Vyšší hloubka průvaru
- Podstatně nižší tepelně ovlivněná oblast
- Vysoká produktivita a snadná možnost automatizace
- Svařování bez přídavného materiálu
- Estetický vzhled svarového spoje

4.2. Nevýhody svařování laserem

- Poměrné vysoké pořizovací a provozní náklady
- Větší nároky na bezpečnost – nutnost chránění zraku kvůli infračervenému záření
- Nemožnost svařování základních materiálů o větších tloušťkách

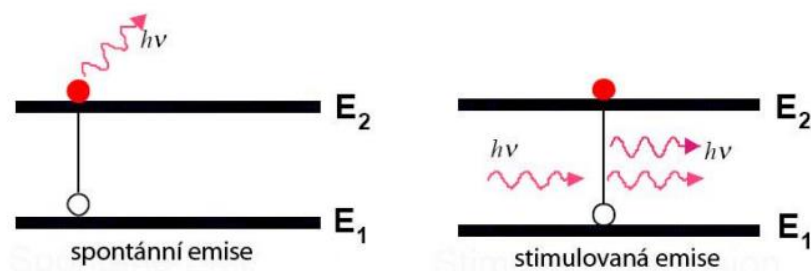
4.3. Fyzikální princip laseru

Základem každého laseru je aktivní prostředí, které může být pevnolátkové, plynové anebo kapalné. V průmyslu se ale nejvíce používají právě pevnolátková a plynová prostředí. Toto aktivní prostředí, které je tvořeno látkou s oddělenými hladinami elektronů, je buzeno (excitováno) různými způsoby, nejčastěji průchodem elektrického proudu nebo ozářením jasným světlem. Když budící záření dopadne na elektron molekuly v aktivním prostředí, předá mu část energie, čímž ho excituje na vyšší energetickou hladinu (viz obrázek 11). Elektron má však obecně sklon držet se v hladině co nejnižší energetické náročnosti, proto se za normálních okolností prakticky ihned vrací do svého základního stavu (na nižší energetickou hladinu) a při návratu emituje (vyzařuje) přebytečnou energii ve formě elektromagnetického záření (fotonu). Tento princip se nazývá spontánní emise záření [24].



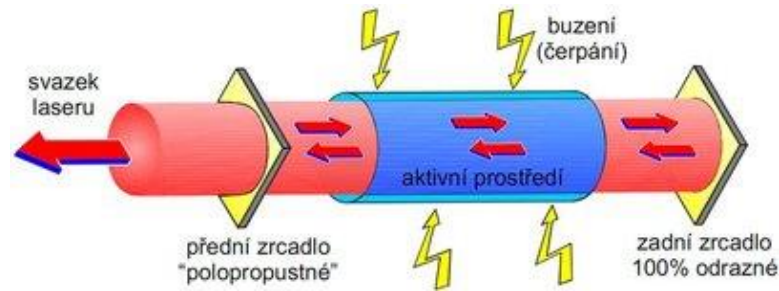
Obrázek 11 - Absorbce a emise záření [25]

Budící záření přiváděné do aktivního prostředí však způsobuje, že většina elektronů je v něm udržována v excitovaném stavu (na vyšší energetické hladině). Tomuto stavu se říká inverze populace. Pokud emitovaný foton projde kolem elektronu v excitovaném stavu, způsobí, že elektron přeskočí zpět na nižší energetickou hladinu a emituje přitom foton ve stejném směru a o stejné vlnové délce a fázi, jako měl foton, který tuto změnu způsobil. V tomto případě jde již o stimulovanou emisi záření, na němž je založen princip vzniku laserového záření [24].

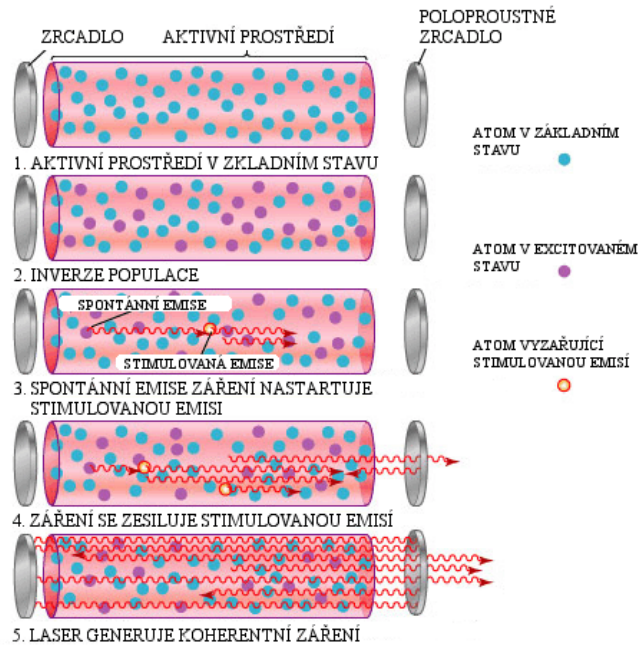


Obrázek 12 – Spontánní a stimulovaná emise záření [25]

Jelikož je ale toto záření velmi slabé, používá se optický rezonátor, který záření zesílí. Nejčastěji je tvořen odrazným a polopropustným zrcadlem s odrazivostí 99,9 %, mezi kterými je umístěno aktivní prostředí (u standardních pevnolátkových laserů tvořeného pevnolátkovým krystalem) [21].



Obrázek 13 – Schéma optického rezonátoru pevnolátkového laseru [21]



Obrázek 14 - Princip vzniku laserového paprsku [21]

5. Rozdělení průmyslových laserů pro svařování

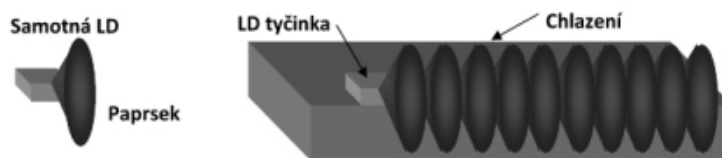
Lasery vhodné pro použití ve strojírenském průmyslu můžeme rozdělit dle aktivního prostředí na dvě skupiny.

5.1. Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery jsou charakterizovány aktivním prostředím tvořených pevnou látkou, nejčastěji v podobě krystalů (tvořených granáty nebo skly či oxidy). Na rozdíl od plynových laserů je zde nejčastěji optické buzení. Tyto typy laserů se dále dělí dle aktivního prostředí na diodové (někdy se řadí do samostatné skupiny polovodičových laserů), diskové, vláknové a Nd:YAG lasery [26].

5.1.1. Diodové lasery

Aktivním prostředím diodového laseru je elektricky čerpaná polovodičová dioda, která mění elektrickou energii na energii světelnou. Samotná laserová dioda má malý výkon, proto se používá seřazení těchto diod do jednodílných polovodičových tyčinek. Tyto tyčinky pak mohou být následně zkombinovány k vytvoření diodového laseru [26].

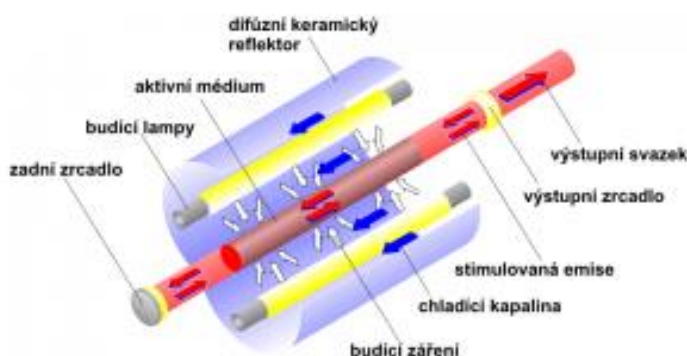


Obrázek 15 - Uspořádání jednotlivých laserových diod do tyčinky [27]

Diodové lasery se pohybují od výkonu v mW až do kW. Tyto lasery mají vysokou účinnost, ale trpí nízkou kvalitou výstupního paprsku. Diodové lasery s vysokým výkonem se v průmyslu používají zejména pro svařování a povrchové kalení, protože plocha, na kterou lze paprsek zaostřit, je oproti ostatním typům laserů větší. Díky nižším vlnovým délkám 800 až 980 nm lze diodové lasery využít i při svařování některých plastů. Velkou předností těchto laserů je jejich kompaktnost a vysoká účinnost přeměny světla. Velkou nevýhodou je závislost parametrů generovaného záření na teplotě. Z tohoto důvodu jsou u těchto laserů kladeny vysoké nároky na jejich chlazení [26] [27].

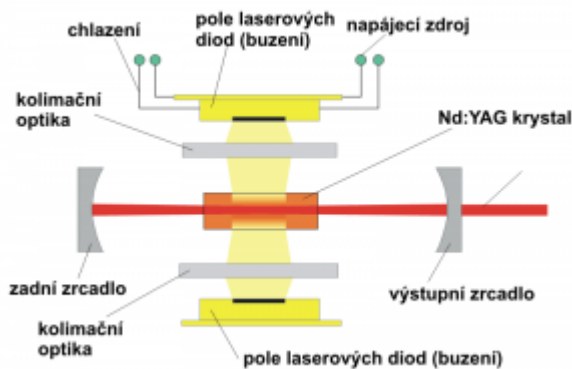
5.1.2. Tyčové Nd:YAG lasery

Jde o nejdéle používané lasery v průmyslu. V případě typu LPSS – lamp pumped solid state je tyčové aktivní prostředí buzeno výbojkami umístěnými rovnoběžně v ose rezonátoru. Tento typ laseru má obecně nižší účinnost přeměny elektrické energie na světelnou energii, protože velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo (je nutné chlazení vodou). V dnešní době se LPSS Nd:YAG lasery používají zejména v pulsním režimu pro laserové svařování (aplikace s požadavkem hlubokého průvaru a malé teplotně ovlivněné oblasti) a vrtání (např. v leteckém průmyslu pro vrtání ušlechtilých ocelí a slitin). Výhodou těchto laserů je vysoká energie, kterou zmíněné aplikace vyžadují. Nevýhodou je nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost budících výbojek [26].

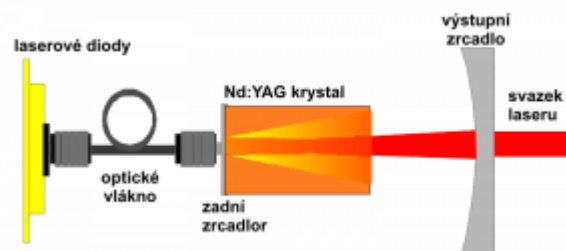


Obrázek 16 - Konstrukce LPSS Nd:YAG laseru [26]

Oproti tomu mají DPSS – diode pumped solid state lasery obecně vyšší účinnost přeměny energie, proto jsou zde menší nároky na chlazení. Rozlišují se dva základní typy buzení a to na základě uspořádání rezonátoru – boční buzení a zadní buzení. U zadního buzení se budící záření z laserových diod vede do YAG krystalu optickým vláknem, diody tak mohou být externě mimo rezonátor. DPSS Nd:YAG lasery se používají hlavně v tzv. Q-spínaném pulsním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy a průměrný výkon se pohybuje do 100W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V porovnání s LPSS lasery je zde vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení [26].



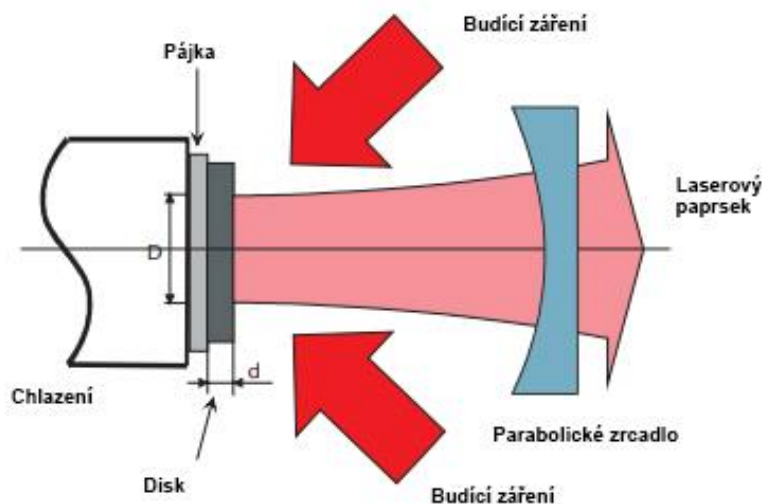
Obrázek 17 - Diodami bočně buzený DPSS Nd:YAG laser [26]



Obrázek 18 - DPSS Nd:YAG laser se zadním diodovým buzením [26]

5.1.3. Diskové lasery

Generace paprsku probíhá na podobném principu jako u běžné tyčových Nd:YAG laserů s tím rozdílem, že aktivním médiem je tenký disk krystalu Yb:YAG a nebo Nd:YVO4. Velkou výhodou tvaru disku je rovný teplotní profil, teplo odchází rovnoměrněji a plochu disku lze lépe chladit. Disk má průměr několika mm (v závislosti na výstupním výkonu) a tloušťku 100 až 200 μm . Tento disk je namontován zadní stranou na vodou chlazený chladič pomocí pájky. Tato technika umožňuje velmi pevnou fixaci disku na chladič bez jakékoli deformace. Budící záření, generované laserovými diodami, je přivedeno do dutiny diskového laseru obvykle za použití optického vlákna. Budící záření se v dutině odráží mezi soustavou zrcadel. Z jedné strany dutiny je zrcadlo parabolické, které dopadající budící záření odráží na disk s aktivním prostředím. Za ním se nachází reflexní vrstva a chladič soustava. Část dopadajícího budícího záření se absorbuje, většina se ale odrazí zpět směrem k parabolickému zrcadlu. Proto je nutná ještě soustava odrazových zrcadel na straně disku, která takto odražené paprsky vrací směrem k parabolickému zrcadlu a následně zpět do aktivního prostředí. Zde se budící záření koncentruje a stimuluje emisi laserového paprsku, který se následně vede přes výstupní zrcadlo a optické vlákno až do místa požadované aplikace. To umožňuje dosažení vysokých výkonů (až 16 kW) s dobrou kvalitou výstupního svazku. Diskové lasery mají vynikající kvalitu paprsku. Nevýhodou těchto laserů je však nízká efektivita přeměny elektrické energie na energii světla [21] [28].



Obrázek 19 - Princip diskového laseru [28]

5.1.4. Vláknové lasery

Vláknový laser dnes představuje nejperspektivnější a technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru s širokým záběrem využití. Aktivní prostředí tvoří vnitřní část dlouhého optického vlákna dopovaného prvky lanthanoidů, nejčastěji erbiem nebo ytterbiem. Tato vlákna mohou mít různý průřez, který je čtvercový, obdélníkový apod., tím udává různé individuální průmyslové použití. Optické vlákno vláknových laserů tak v podstatě odpovídá svou funkcí úloze krystalu u pevnolátkových laserů, tedy vytváří se v něm laserový paprsek a optické vlákno funguje nejen jako aktivní prostředí, ale jako celý rezonátor (optický zesilovač). Buzení z laserových diod je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a místo zrcadel jsou zde tzv. Braggovy mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákně. Záření je pak z vlákna „vyvázáno“ pomocí optického kolimátoru [29].



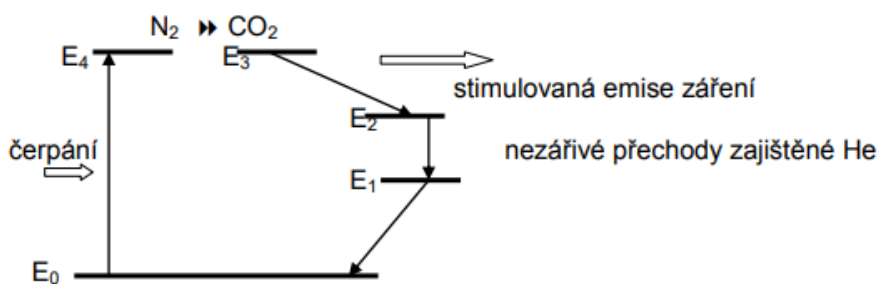
Obrázek 20 - Princip vláknového laseru [26]

5.2. Plynové lasery

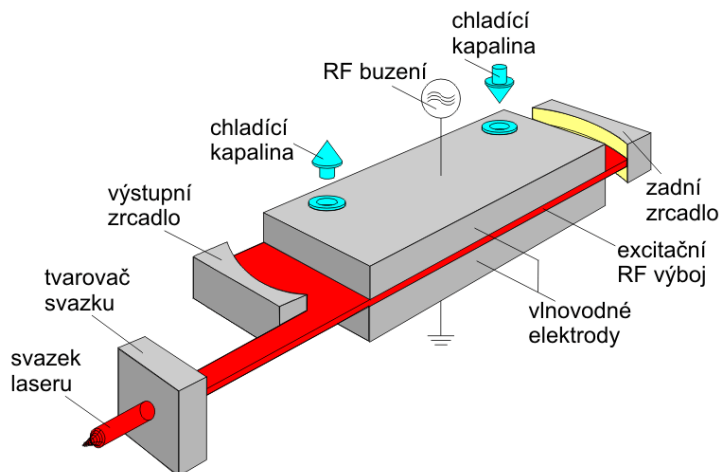
Plyn nebo směs plynů zde tvoří aktivní prostředí. Plynové lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Jejich excitace je většinou realizována pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, optická excitace se používá jen zřídka. Plynové lasery mají homogenní aktivní prostředí, které zajišťuje jejich výborné parametry. Nevýhodou je poměrně malý výkon. Pod kategorií plynových laserů řadíme excimerové a CO₂ lasery, které bývají v průmyslu nejpoužívanější [30] [31].

5.2.1. CO₂ lasery

Aktivní prostředí CO₂ laserů tvoří směsice plynů He + N₂ + CO₂ uzavřených ve skleněné trubici nejčastěji v poměru 82 : 13,5 : 4,5. Celý proces zesílení začíná excitací molekuly dusíku na vibrační hladinu E4 (viz obrázek 21). Při srážkách molekul dusíku s molekulami oxidu uhličitého dochází k rezonančnímu přenosu energie a excitaci CO₂ na hladinu E3. Vyzáření fotonu je realizováno při přechodu molekuly CO₂ z hladiny E3 na hladinu E2. Aby nedošlo při kontinuálním vyzařování ke snížení inverze, je nutné zajistit návrat molekul CO₂ z hladiny E2 na základní hladinu E0. U výkonových plynových laserů se pro návrat molekuly CO₂ do základního stavu používá helium, které odnímá oxidu uhličitému excitační energii a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí laseru. Podle směru proudění plynu v aktivní zóně se lasery rozdělují na typy s podélným prouděním, nejčastěji čerpané doutnavým výbojem a s příčným prouděním plynu s vyšším výkonem čerpané vysokofrekvenčním výbojem. Plynové lasery CO₂ mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu a jejich výkon se běžně pohybuje od 0,5 do 20 kW [16].



Obrázek 21 - Princip plynového laseru [16]



Obrázek 22 - Konstrukce plošného difúzí chlazeného CO₂ slab laseru [26]

Tabulka 9 - Porovnání diskového a CO₂ laseru [32]

Technický parametr	SSL (diskový laser)	CO ₂ laser
Aktivní prostředí	Pevná látka – krystal	Plyn
Rozsah výkonu	1 - 24 kW	2 - 20 kW
Vlnová délka	~ 1 μm	~ 10 μm
Koeficient absorpce (ocel)	~ 0,3	0,06
Možnost změn výkonového profilu paprsku	Ano – brightline	Ne
Vedení laserového paprsku	Optickým vláknem	Vzduchem
Účinnost přeměny el. energie	~ 35 %	~ 6 %

Z tabulky 9 je patrné, že diskový laser z hlediska technických parametrů znatelně výhodnější než CO₂ laser. Z toho důvodu ho také společnost *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* používá ve své výrobě.

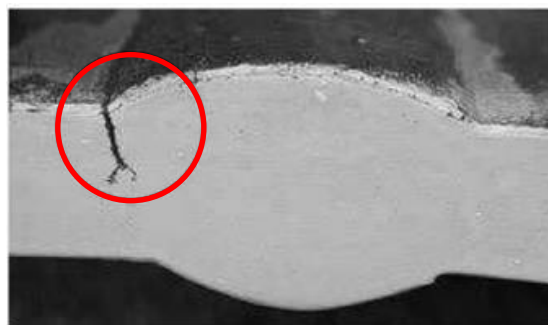
6. Možné vady u svarových spojů

Dle normy ČSN EN ISO 6520 – 1 (Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů) se může ve svarových spojích vyskytovat celkem 6 skupin vad: trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje a neprůvary, vady tvaru a rozměru, různé vady. Každá tato skupina vad se následně dělí na několik podskupin, které mají, dle již zmíněné normy, své jedinečné číselné označení (klasifikaci) [33].

6.1. Trhliny

Trhlina je vada způsobená místním porušením v tuhém stavu, která se může objevit vlivem ochlazování nebo napětí [33].

- 100 – Trhlina
- 1001 – Mikrotrhlina
- 101 – Podélná trhlina
- 102 – Příčná trhlina
- 103 – Hvězdicová trhlina
- 104 – Kráterová trhlina
- 105 – Skupina nespojitých trhlin
- 106 – Rozvětvené trhliny

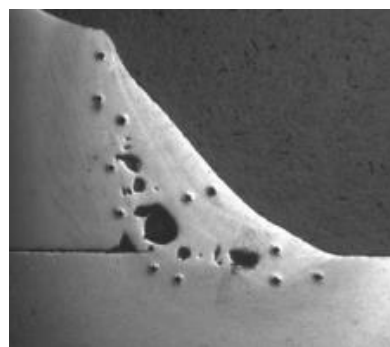


Obrázek 23 - Podélná trhlina [33]

6.2. Dutiny

Dutina se může tvořit uzavřeným plynem ve svaru. Bývá převážně kulovitěho tvaru, kterému se říká pór [33].

- 201 – Plynové dutiny (gas cavity)
- 2011 – Pór
- 2012 – Rovnoměrná pórovitost
- 2013 – Shluk pórů
- 2014 – Řádek pórů
- 202 – Staženina
- 2024 – Kráterová staženina

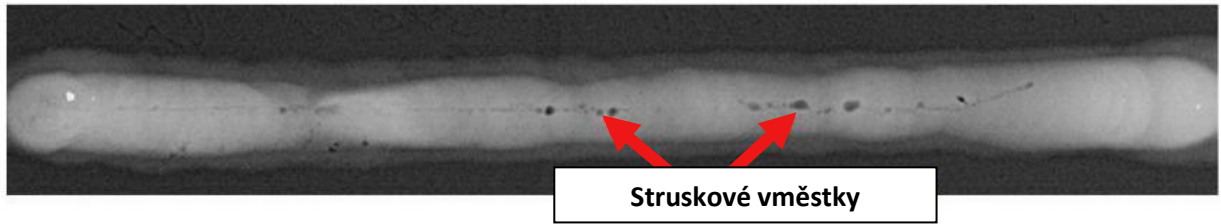


Obrázek 24 - Vnitřní póry [33]

6.3. Pevné vměstky

Pevné vměstky jsou cizí látky zachycené ve svarovém kovu [33].

- 300 – Pevný vměstek
- 301 – Struskový vměstek
- 302 – Tavidlový vměstek
- 303 – Oxidický vměstek
- 304 – Kovový vměstek



Obrázek 25 - Struskové vměstky [33]

6.4. Studené spoje a neprůvary

Jde o nedostatečné spojení (natavení) mezi svarovým kovem a základním materiálem nebo mezi jednotlivými vrstvami svarového kovu [33].

- 400 – Studený spoj a neprůvar
- 401 – Studený spoj
- 402 – Neprůvar
- 403 – Jehlice



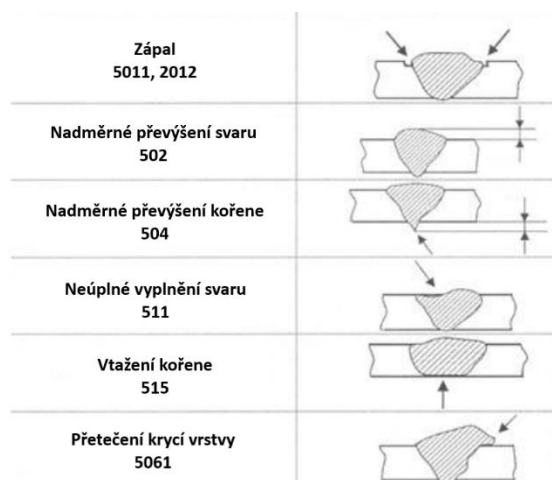
Obrázek 26 - Neprůvar kořene koutového svaru [33]

6.5. Vady tvaru a rozměru

Nesprávný tvar vnějších povrchů svaru nebo nepřípustná geometrie svarového spoje. Odchylka od předepsaného rozměru svaru [33].

- 500 – Vada tvaru
- 501 – Zápal
- 5011 – Souvislý zápal
- 5012 – Nesouvislý zápal
- 5013 – Vrub v kořeni
- 502 – Nadměrné převýšení tupého svaru
- 503 – Nadměrné převýšení koutového svaru
- 504 – Nadměrné převýšení kořene
- 505 – Strmý přechod svaru
- 506 – Přetečení
- 507 – Lineární přesazení
- 508 – Úhlové přesazení
- 509 – Proláklina
- 510 – Díra
- 511 – Neúplné vyplnění svaru
- 512 – Nadměrná asymetrie koutového svaru
- 513 – Nepravidelná šířka
- 514 – Nepravidelný povrch

- 515 – Hubený kořen
- 517 – Vadné napojení
- 520 – Nadměrná deformace
- 521 – Nesprávný rozměr svaru



Obrázek 27 - Příklady vad tvaru a rozměru [33]

6.6. Různé vady

Všechny vady, které nemohou být zařazeny do výše zmíněných skupin [33].

- 600 – Různé vady
- 601 – Dotyk elektrodou
- 602 – Rozstřík
- 603 – Vyvržený povrch
- 604 – Stopa po broušení
- 605 – Stopa po sekání
- 606 – podbroušení
- 607 – Vada stehu
- 608 – Přesazení protilehlých housenek
- 610 – Náběhové zabarvení



Obrázek 28 – Rozstřík [33]

Experimentální část

Cíle experimentu:

- Zjištění současného stavu výroby produktu podélně svařované korozivzdorné trubky
- Zvýšení efektivity výroby produktu
- Zajištění kvalitativních podmínek na základě zavedených kontrol společností *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* a jejím zákazníkovi

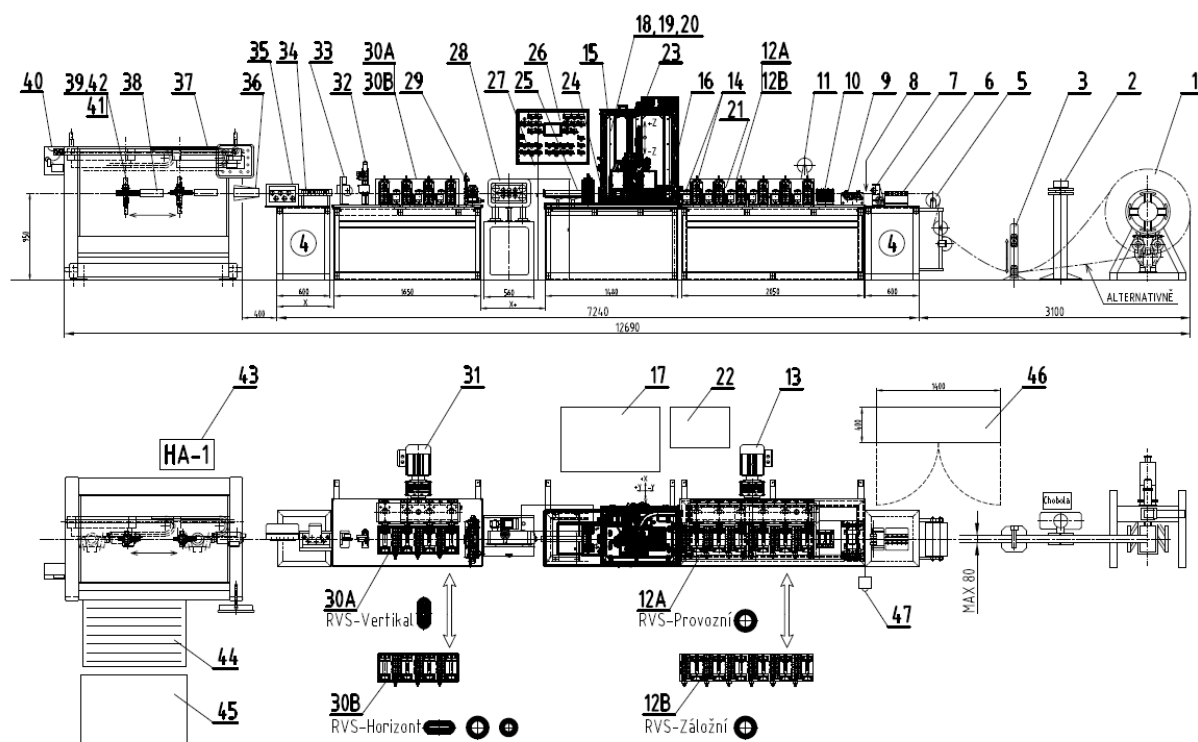
7. Popis výrobní linky

Experimentální část byla prováděna na výrobní lince (s interním označením „S2“) zkonstruované firmou *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* pro účely výroby podélně svařované korozivzdorné trubky, která je blíže specifikovaná v kapitole 2.1. Linka se nachází ve výrobním areálu společnosti v provozovně na Sibřině.



Obrázek 29 - Výrobní linka S2

Nastavení procesních parametrů laseru z hlediska výroby je přímo vztažené k taktu výroby linky. Není tedy důležité mít jen správně nastavené parametry přímo vázané k laserovému svařování jako výkon, průtok argonu, teplota laseru, spot, kolimace, fokusace, ale také správně nastavený přítlak rolen, korekce kalibrace, pozice válcovacích rolen, atd. Tyto nastavitelné parametry a jejich změny v následujícím experimentu zvyšování rychlostí jsou blíže popsány v kapitole 7.2.1.



Obrázek 30 - Výkres výrobní linky
(popis a vysvětlení je uvedeno v kapitole 7.1.)

Provedení linky je pravo-levé, to znamená, že vstupní materiál ve formě svitku se zavádí z pravé strany a na levé straně vyjíždějí výrobky, které se shromažďují do beden. Linka se skládá z pěti základních sekcí. Na začátku linky je AOZ025 odvíják, na kterém je nasazený svitek s materiálem. Následuje formovací sekce, kde se za použití několika seskupení rolen válcuje požadovaný tvar trubky. Nejdůležitější částí linky je svařovací uzel, ve kterém je uložena svařovací hlava. V této části dochází ke kontinuálnímu podélnému svařování trubky pomocí laseru Trumpf – 2kW – TruDisk 2002 (blíže specifikován v tabulce 10). Předposlední hlavní součástí linky je kalibrační sekce, kde se kontrolují rozměry trubky. V posledním úseku dochází k letmému stříhu výrobku na požadovaný rozměr (viz kapitola 2.1.).

7.1. Pozice ve výkresu

1. Odvíják AOZ025 s odvíjením do smyčky – odvíjení shora i odspodu (obojí)
2. Nastavení pásky otočné NP80x0,5 (odporová svářečka Chobola)
3. Sledování smyčky
4. Stůl L = 600 mm
5. Konzole pro navádění pásky přechodem přes kladky
6. Navádění pásky HVP80x0,5 před ořezem
7. Ořez pásky pro zkoušky rozvinu (šířky)
8. Prostor cca 60 mm pro aktivní měření šířky pásky
9. Navádění pásky HVP80x0,5 mezi ořezem a orlojem
10. Orloj se značením "S2"
11. Navíjení špon od ořezu

- 12A. Formovací sekce pro formování Tr Ø8 mm - provozní RVS-8
- 12B. Formovací sekce pro formování Tr Ø8 mm - záložní RVS-8
13. Pohon formovací klece s regulací otáček
14. 1x Finn-pas NS25 včetně, mezistolice (součást formovací sekce)
15. Skříň svařovacího uzlu
16. Navádění trubky Ø8 na štěrbinu "ORLOJ" - 1 ks – stavitelný ve směru pohybu profilu (osa y)
17. Laser Trumpf – 2kW – TruDisk 2002, Laserline – 1200 W
18. Svařovací uzel dvouválcový GV25 + tenzometr včetně tenzometrického měření síly přítlaku
19. Držák optické hlavy s regulací v ose X, Z
20. 2D scanner (pozice spáry) - Ing. Štajnochr SW
21. Závěs vnitřního ofuku – Ar
22. Chlazení laseru a optické hlavy
23. Odsávání spalin od svařování (150 m3/hod) - ECO ŠIMKO – pozvat ke konzultaci + odsávání boční Festo ejektor "do sudu"
24. Přidržovací válce (nehané) ala kováč – kvůli Twist válcům
25. Chladicí tunel trubky Ø8 + vodní okruh pro chlazení 2D scan., chlazený ofuk argonu, chlazení hřídelí svař. rolen
26. Ovládací panel
27. Mezera pro možnost natočení trubky – cca 800 mm
28. Odtahové válce AB TECH – LCAT-25
29. Twist válce TW25
- 30A. Kalibrační sekce přechod z průměru na ovál (4ks-stojany) RVS-Vertikal
- 30B. Kalibrační sekce přechod z průměru na ovál (4ks-stojany) RVS-Horizont
31. Pohon kalibrační sekce
32. Optická kontrola (jako S1) - SICK
33. IRC25 – odměřování délek - Ø65,19 mm průměr kaleného kolečka
34. Vertikální rovnačka
35. Horizontální rovnačka
36. Navádění před stříhadlem
37. Dělička ALDA25x0,5-25
38. Navádění do střížné jednotky
39. Střížná jednotka SJ8x0,3
40. Mazání stříhu – Tribotec
41. Odsávání špon
42. Odsávání aerosolu od stříhu
43. Hydraulický agregát HA-1
44. Skluz nebo vynášecí dopravník s propadlem (pro selekci zmetků)
45. Paleta hotových kusů
46. Elektrorozvaděč
47. Mobilní ovladač linky
48. Kalibrace
49. Rozvod Argonu

Tabulka 10 - Technická specifikace laseru Trumpf – 2kW – TruDisk 2002 [34]

Technický parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	2000	W
Dlouhodobá stabilita výkonu	± 1 s laserovým ovládáním výkonu	%
Nastavitelný rozsah výkonu	2 (3) až 100	%
Kvalita paprsku na vstupní spojce do vlákna	8	Mm
Numerická clona za vláknem	0,1	-
Vlnová délka	1030	Nm
Maximální počet výstupů	4	-
Ø Kabelu laserového světla	200	μm
Rozměr	0,85	m ²
Příslušenství	Integrovaný výměník tepla	-
Hmotnost	500	Kg
Možnosti chlazení	Integrovaný výměník tepla (standard) nebo integrovaný kompresorový chladič (volba pro výkonový rozsah 3 - 6 kW)	-
Rozsah teploty chladicího média	Integrovaný kompresorový chladič: 5 až 38	°C
Okolní teplota v provozu	10 až 50	°C
Účinnost	Až do 34	%

7.2. Současný stav výroby

7.2.1. Parametry výrobní linky

Experiment byl prováděn při těchto nastavitelných parametrech výrobní linky:

Tabulka 11 - Parametry výrobní linky při současné výrobě

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	1050	W
Rychlost výroby	7,0	m/min
Korekce kalibrace	0,5 - 1	%
Průtok argonu – hlavní	24,7	l/min
Průtok argonu – vnitřní	16,9	l/min
Přítlak rolen	170 - 240,0	N
Teplota laseru	18 - 30	°C
Průtok chladicího média svařovací hlavy	1,5 - 2,0	l/min
Tlak demineralizované vody Svařovací hlavy	4 - 5	Bar
Spot (průměr stopy dopadu laserového paprsku)	300	μm
Kolimace	200	mm
Fokusace	200	mm

7.2.2. Popis aktuálních kontrol kvality svarového spoje a parametrů výrobku

Při běžné výrobě se vyrobí v průměru 10 000 kusů trubek za den, přičemž se níže zmíněné metody kontroly provádí jednou za přibližně 1 000ks. To odpovídá zhruba deseti kontrolám za dvanáctihodinovou směnu. Za účelem zjištění aktuálního stavu výrobku, který bude sloužit k porovnání s následujícím navrženým experimentem zvyšování rychlosti svařování, bylo vytvořeno šest vzorků polotovaru s označením SS – 1 až SS – 6. Následně byly tyto vzorky vyhodnoceny pěti kontrolními metodami, kterými se pozorují požadované parametry, které určila firma *Attla spol. s.r.o. Továrna na stroje* na základě požadavků zákazníka, který tyto podmínky určil po provedení laboratorních a provozních testů tak, aby byly vyhovující z hlediska kvality výrobku. Všechny vytvořené vzorky byly podrobeny vizuální kontrole ohybu trubky, vizuální kontrole oxidace na povrchu svaru a kontrole měření požadovaných rozměrů svarových spojů.

a) Vizualní kontrola ohybu trubky

Vizuální kontrola ohybu trubky spočívá v ustavení vzorku na perfektně rovný povrch. Okem se sleduje, zda není vzorek trubky zřetelně ohnutý. Jde o první kontrolu v procesu testování, protože v případě ohnuté trubky nemá smysl pokračovat v dalších kontrolách a výroba se musí okamžitě zastavit a hledat příčina. Všechny testované vzorky prošly vstupní vizuální kontrolou na ohyb.



Obrázek 31 - Přípravek pro kontrolu ohybu trubky








Obrázek 32 - Kontrola vytvořených vzorků na ohyb

b) Vizualní kontrola oxidace na povrchu svaru

V průběhu svařování korozivzdorné oceli dochází k oxidaci povrchu – mění se náběhové barvy (viz tabulka 12) a vzniklé oxidy ovlivňují mechanické vlastnosti, což může být od určité velikosti ovlivnění nepřijatelné, proto je nutné tento jev kontrolovat. Kontrola se provádí na hotovém výrobku v oblasti svarového spoje pomocí níže uvedené tabulky, kterou vytvořil přímo zákazník. Vzorek se k tabulce přiloží a na základě barvy, která je závislá na teplotě, se vizuálně kontroluje zbarvení svaru. Povolené zbarvení svaru je od bíložluté (200 °C) po nachovou (270 °C). Od fialové (280 °C) po světle modrou (320 °C) je svar přijatelný v případě, že právě taková oxidace svaru není delší než 4 cm. Modrošedá (340 °C) a šedá barva (360 °C) oxidace svaru je nepřijatelná.


Vzorky vyrobené při zjišťování aktuálního stavu výroby odpovídaly bíložluté barvě, což je z hlediska této kontroly nejlepším možným výsledkem.

Tabulka 12 - Barevná škála pro kontrolu oxidace povrchu svaru

Barva	Teplota
 Bíložlutá	200 °C
 Slámově žlutá	220 °C
 Zlatavě žlutá	230 °C
 Žlutohnědá	240 °C
 Hnědočervená	250 °C
 Červená	260 °C
 Nachová	270 °C
 Fialová	280 °C
 Tmavě modrá	290 °C
 Chrpově modrá	300 °C
 Světle modrá	320 °C
 Modrošedá	340 °C
 Šedá	360 °C



OK



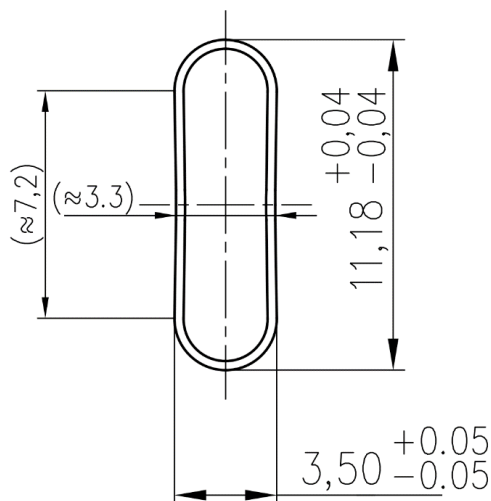
OK
v případě, že barva
švu není delší než 4 cm



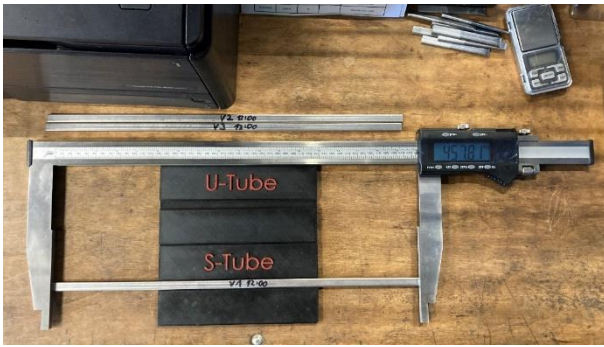
NOK

c) Měření požadovaných rozměrů

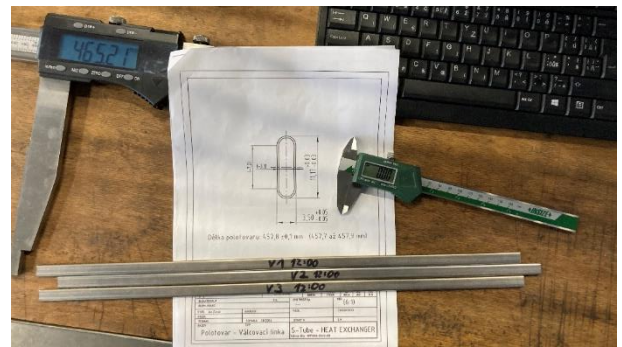
Požadované rozměry se měří posuvným měřidlem minimálně třikrát, aby se zamezilo chybám měření. V tomto případě se měří šířka, výška a délka polotovaru. Při měření délky se využívá vytištěného přípravku pro uložení trubky a posuvných měřidel. Rozměry musí odpovídat rozměrům specifikovaných na obrázku 9. Délka polotovaru musí být $457,8 \pm 0,1$ mm.



Obrázek 33 - Rozměry polotovaru



Obrázek 34 - Vzorek uložený v přípravku na měření



Obrázek 35 - Měření vytvořených vzorků

Tabulka 13 - Naměřené rozměry při zjišťování aktuálního stavu výroby

Číslo vzorku:	Počet měření	Kontrolované rozměry		
		Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]
SS – 1	1	3,49	11,20	457,81
	2	3,52	11,18	457,82
	3	3,50	11,20	457,81
SS – 2	1	3,49	11,19	457,90
	2	3,50	11,19	457,91
	3	3,52	11,20	457,88
SS – 3	1	3,50	11,19	457,87
	2	3,48	11,21	457,85
	3	3,51	11,18	457,88
SS – 4	1	3,51	11,21	457,84
	2	3,49	11,18	457,84
	3	3,53	11,18	457,84
SS – 5	1	3,49	11,19	457,85
	2	3,49	11,20	457,86
	3	3,51	11,19	457,83
SS – 6	1	3,51	11,21	457,90
	2	3,50	11,20	457,88
	3	3,50	11,21	457,89

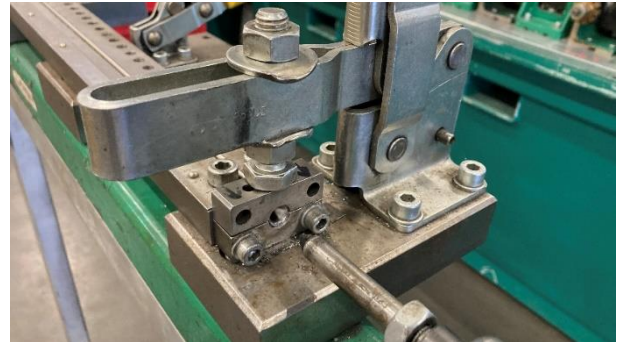
Z tabulky 13 je patrné, že veškeré naměřené hodnoty odpovídají zmíněným kvalitativním podmínkám na výrobek.

d) Tlaková kontrola pevnosti svaru

Kontrola tlakem neboli pracovně „burst test“ se provádí za účelem zjištění pevnosti svaru. Vzorek se na obou koncích rozevře pomocí přípravku s kuželem, aby se dala trubka použít v dalším přípravku na utěsnění. Zkouška spočívá v upnutí vzorku do přípravku, který se na jednom konci utáhne a tím se zajistí proti úniku vody. Druhý konec přípravku se připojí na hadici. Následně se pustí čerpadlo a vzorek trubky se natlakuje vodou. Při tlaku přibližně 4,8 MPa trubka praská. Smyslem zkoušky je zjistit, zda je svar natolik pevný, aby trubka nepraskla v místě svaru a svar tak vykazoval vyšší pevnost než základní materiál. Vyhodnocuje se tedy místo prasknutí. Pokud vzorek praskl mimo oblast svaru, zkouška se považuje za úspěšnou.



Obrázek 36 - Pracoviště pro přípravu vzorku na provedení tlakové kontroly pevnosti svaru



Obrázek 37 - Přípravek pro vytvoření kuželovitého konce trubky

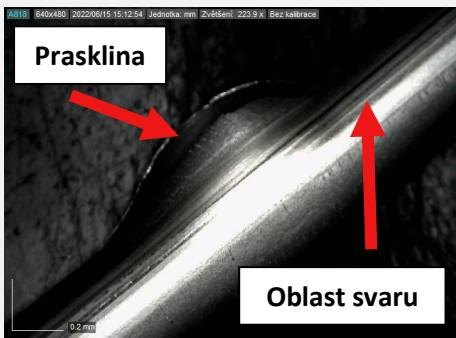



Obrázek 38 - Pracoviště pro provádění kontroly pevnosti svaru

Toto zařízení, které bylo zkonstruováno tzv. „na míru“ firmou *Attl a spol. Továrna na stroje* pro její potřeby, se skládá ze zásobníku vody, hliníkové konstrukce, vodního čerpadla, ovládacího tlačítka, páky pro zahájení tlakování, hadic a z přípravků pro utěsnění trubky.

Této kontrole byly podrobeny vzorky s číselným označením SS – 5 a SS – 6.

Tabulka 14 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
SS – 5		SS – 6	

Z fotografií vzorků po kontrole pevnosti svaru v tabulce 14 je patrné, že na všech trubičkách vznikla prasklina mimo oblast svaru, tudíž jsou tyto výsledky vyhovující.

e) Kontrola geometrie svarového spoje v příčném řezu

Kontrola geometrie svarového spoje neboli pracovně „výbrus“, se provádí za účelem detailní vizuální kontroly geometrie svaru, ale také za účelem zjištění jeho přesných rozměrů. Tyto rozměry jsou specifikovány firmou *Attl a spol. Továrna na stroje* na základě požadavků zákazníka. Vzorky trubiček se ustříhnou na přibližné rozměry dané dorazem, následně se místo svaru vybrousí za sucha pomocí brusného otočného kotouče s hrubostí P1000. Vzorky, které jsou připojeny k baterii s napětím 12 V a odporem 6 A, se ponoří do technické kyseliny šťavelové s minimálním obsahem kyseliny 99,6 % (viz obrázek 39). Vzorky jsou v lázni s kyselinou přibližně 5 minut. Následně se opláchnou v čisté vodě a zbaví se nežádoucích nečistot (viz obrázek 40). Vzorky se jednotlivě umístí do přípravku pod digitální mikroskop DinoLite s rozlišením 1,3 Mpx a zvětšením 10x až 70x, kde se trubičky vyhodnocují. Pomocí programu DinoCapture 2.0 se vzorek vyhodnotí. Jde v podstatě o zjednodušenou zkoušku makrostruktury, která je předmětem kapitoly 8.

Aby byla zkouška vyhovující, musí být šířka kořene svaru v rozmezí od 0,42 mm do 0,72 mm a výška svaru (velikost svaru) v rozmezí od 0,25 mm do 0,35 mm. Tloušťka stěny musí odpovídat základnímu materiálu 0,3 mm s tolerancí $\pm 0,02$ mm.



Obrázek 39 - Pracoviště pro provedení příčného řezu a výbrusu trubky



Obrázek 40 - Vzorky připravené ke zkoušce pro kontrolu geometrie svaru

Pracoviště pro provádění této zkoušky „výbrusem“ se skládá z ručních pákových nůžek na plech, lázně s kyselinou, baterie a kabelů a brusného otočného kotouče. Pracoviště pro vyhodnocení vybroušených vzorků kontrolou geometrie svarového spoje v příčném řezu obsahuje mikroskop DinoLite a počítač s programem DinoCapture 2.0.



Obrázek 41 - Mikroskop DinoLite

Této zkoušce byly podrobeny vzorky s číselným označením SS – 1 až SS – 4.

Tabulka 15 – Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
SS – 1		SS – 2	
SS – 3		SS – 4	

Tabulka 16 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby

Číslo vzorku:	Tloušťka stěny [mm]	Šířka kořene svaru [mm]	Výška svaru [mm]
SS – 1	0,30	0,53	0,31
SS – 2	0,30	0,56	0,33
SS – 3	0,29	0,55	0,31
SS – 4	0,31	0,53	0,32

Z naměřených hodnot výbrusů v tabulce 16 bylo zjištěno, že vzorky odpovídají zadaným podmínkám a byla tak ověřena správnost nastavených parametrů.

7.3. Zvýšení rychlosti na 7,2 m/min

V první části experimentu byla zvýšena okamžitá výrobní rychlost linky na 7,2 m/min a výkon laseru na 1070 W. Bylo opět vytvořeno šest vzorků trubek. Všechny tyto vzorky byly vyhodnocovány za stejných podmínek, zmíněných při zjišťování současného stavu výroby.

Tabulka 17 - Nastavené parametry při rychlosti 7,2 m/min

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	1070	W
Rychlost výroby	7,2	m/min
Korekce kalibrace	0,5 - 1	%
Průtok argonu – hlavní	24,7	l/min
Průtok argonu – vnitřní	16,9	l/min
Přítlak rolen	170 - 240,0	N
Teplota laseru	18 - 30	°C
Průtok chladicího média svařovací hlavy	1,5 - 2,0	l/min
Tlak demineralizované vody Svařovací hlavy	4 - 5	Bar
Spot	300	μm
Kolimace	200	mm
Fokusace	200	mm

a) Vizualní kontrola ohybu trubky

Při této vizualní zkoušce nebyl upozorován oproti současnému stavu žádný ohyb trubky, tudíž jsou všechny vzorky z hlediska požadavků této zkoušky vyhovující.

b) Vizualní kontrola oxidace na povrchu svaru

Nebyly zjištěny žádné změny v barvě na povrchu svaru. Všechny vyhodnocované vzorky se pohybovaly v rozmezí světležluté barvy (viz tabulka 12).

c) Měření požadovaných rozměrů

Tabulka 18 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,2 m/min

Číslo vzorku:	Počet měření	Kontrolované rozměry		
		Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]
7.2 – 1	1	3,51	11,19	457,90
	2	3,52	11,20	457,89
	3	3,49	11,21	457,90
7.2 – 2	1	3,48	11,18	457,85
	2	3,48	11,19	457,84
	3	3,52	11,20	457,86
7.2 – 3	1	3,52	11,20	457,87
	2	3,53	11,19	457,83
	3	3,52	11,20	457,82
7.2 – 4	1	3,51	11,19	457,86
	2	3,48	11,19	457,88
	3	3,50	11,20	457,88
7.2 – 5	1	3,50	11,18	457,87
	2	3,51	11,19	457,88
	3	3,51	11,19	457,87
7.2 – 6	1	3,54	11,18	457,88
	2	3,49	11,21	457,88
	3	3,53	11,20	457,88

Z tabulky 18 je patrné, že při zvýšení rychlosti na 7,2 m/min nedošlo k žádné změně kontrolovaných rozměrů a veškeré vzorky vyhovují požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2. c).

d) Tlaková kontrola pevnosti svaru

Tabulka 19 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,2 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.2 – 5		7.2 – 6	

Z fotografií vzorků po tlakové kontrole pevnosti svaru v tabulce 19 je patrné, že na všech trubičkách vznikla prasklina mimo oblast svaru, tudíž jsou tyto výsledky vyhovující požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2 d).

e) Kontrola geometrie svarového spoje v příčném řezu

Tabulka 20 – Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,2 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.2 – 1		7.2 – 2	
7.2 – 3		7.2 – 4	

Tabulka 21 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,2 m/min

Číslo vzorku:	Tloušťka stěny [mm]	Šířka kořene svaru [mm]	Výška svaru [mm]
7.2 – 1	0,31	0,60	0,34
7.2 – 2	0,30	0,558	0,34
7.2 – 3	0,31	0,60	0,33
7.2 – 4	0,31	0,59	0,35

Z naměřených hodnot výbrusů v tabulce 21 bylo zjištěno, že vzorky odpovídají zadaným podmínkám specifikovaným v kapitole 7.2.2. e) a byla tak ověřena správnost nastavených parametrů.

7.4. Zvýšení rychlosti na 7,6 m/min

V druhé části experimentu byla zvýšena výrobní rychlost na 7,6 m/min a výkon na 1100 W. Opět bylo vytvořeno šest vzorků polotovaru. Všechny tyto vzorky byly vyhodnocovány za stejných podmínek zmíněných ve zjišťování současného stavu výroby.

Tabulka 22 - Nastavené parametry při rychlosti 7,6 m/min

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	1100	W
Rychlost výroby	7,6	m/min
Korekce kalibrace	0,5 - 1	%
Průtok argonu – hlavní	24,7	l/min
Průtok argonu – vnitřní	16,9	l/min
Přítlak rolen	170 - 240,0	N
Teplota laseru	18 - 30	°C
Průtok chladicího média svařovací hlavy	1,5 - 2,0	l/min
Tlak demineralizované vody Svařovací hlavy	4 - 5	Bar
Spot	300	μm
Kolimace	200	mm
Fokusace	200	mm

a) Vizuální kontrola ohybu trubky

Při této vizuální zkoušce nebylo zpozorováno zvýšení ohybu trubky.

b) Vizualní kontrola oxidace na povrchu

V tomto případě bylo zpozorováno mírné ztmavení oblasti svaru, která se přibližovala spíše ke zlatožluté barvě, ovšem i toto zbarvení zmíněné v kapitole 7.2.2. b) je vyhovující.

c) Měření požadovaných rozměrů

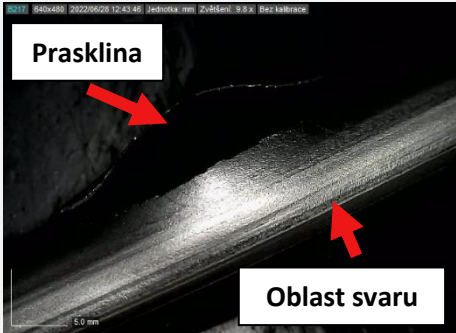

Tabulka 23 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,6 m/min

Číslo vzorku:	Počet měření	Kontrolované rozměry		
		Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]
7.6 – 1	1	3,51	11,19	457,90
	2	3,52	11,20	457,89
	3	3,49	11,21	457,90
7.6 – 2	1	3,48	11,18	457,85
	2	3,48	11,19	457,84
	3	3,52	11,20	457,86
7.6 – 3	1	3,52	11,20	457,87
	2	3,53	11,19	457,83
	3	3,52	11,20	457,82
7.6 – 4	1	3,51	11,19	457,86
	2	3,48	11,19	457,88
	3	3,5	11,20	457,88
7.6 – 5	1	3,5	11,18	457,87
	2	3,51	11,19	457,88
	3	3,51	11,19	457,89
7.6 – 6	1	3,54	11,18	457,83
	2	3,49	11,21	457,82
	3	3,53	11,20	457,88

Z tabulky 23 je patrné, že při zvýšení rychlosti na 7,6 m/min nedošlo k žádné změně kontrolovaných rozměrů a veškeré vzorky vyhovují požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2. c).

d) Tlaková kontrola pevnosti svaru

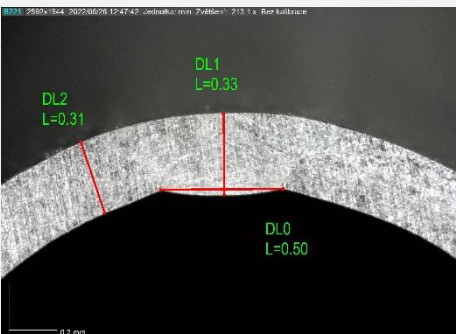
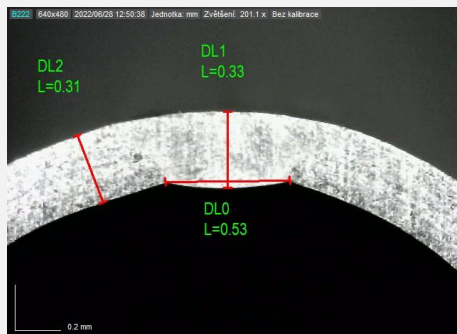
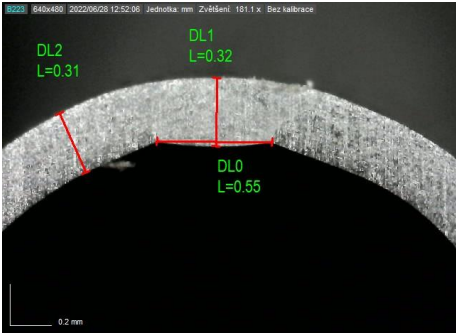
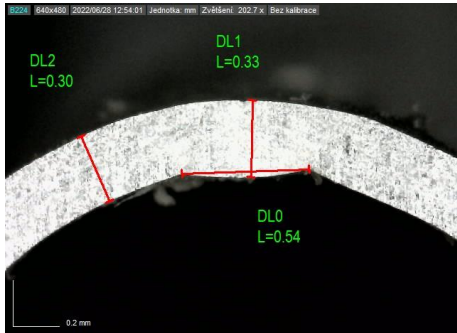
Tabulka 24 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,6 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.6 – 5		7.6 – 6	

Z fotografií vzorků po tlakové kontrole pevnosti svaru v tabulce 24 je patrné, že na všech trubičkách vznikla prasklina mimo oblast svaru, tudíž jsou tyto výsledky vyhovující požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2 d).

e) Kontrola geometrie svarového spoje v příčném řezu

Tabulka 25 - Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,6 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.6 – 1		7.6 – 2	
7.6 – 3		7.6 – 4	

Tabulka 26 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,6 m/min

Číslo vzorku:	Tloušťka stěny [mm]	Šířka kořene svaru [mm]	Výška svaru [mm]
7.6 – 1	0,31	0,50	0,33
7.6 – 2	0,31	0,53	0,33
7.6 – 3	0,31	0,55	0,32
7.6 – 4	0,30	0,54	0,33

Z naměřených hodnot výbrusů v tabulce 26 bylo zjištěno, že vzorky odpovídají zadaným podmínkám specifikovaným v kapitole 7.2.2. e) a byla tak ověřena správnost nastavených parametrů.

7.5. Zvýšení rychlosti na 7,8 m/min

Ve třetí části experimentu byla zvýšena výrobní rychlost na 7,8 m/min a výkon na 1130 W. Opět bylo vytvořeno šest vzorků polotovaru. Všechny tyto vzorky byly vyhodnocovány za stejných podmínek zmíněných ve zjišťování současného stavu výroby.

Tabulka 27 - Nastavené parametry při rychlosti 7,8 m/min

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	1130	W
Rychlost výroby	7,8	m/min
Korekce kalibrace	0,5 - 1	%
Průtok argonu – hlavní	24,7	l/min
Průtok argonu – vnitřní	16,9	l/min
Přítlak rolen	170 - 240,0	N
Teplota laseru	18 - 30	°C
Průtok chladicího média svařovací hlavy	1,5 - 2,0	l/min
Tlak demineralizované vody Svařovací hlavy	4 - 5	Bar
Spot	300	μm
Kolimace	200	mm
Fokusace	200	mm

a) Vizuální kontrola ohybu trubky

Při této vizuální zkoušce nebylo zpozorováno zvýšení ohybu trubky.

b) Vizualní kontrola oxidace na povrchu

V tomto případě bylo zpozorováno mírné ztmavení oblasti svaru, která se přibližovala spíše ke zlatožluté barvě, ovšem i toto zbarvení zmíněné v kapitole 7.2.2. b) je vyhovující.

c) Měření požadovaných rozměrů

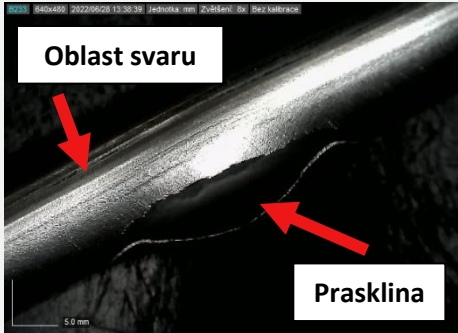
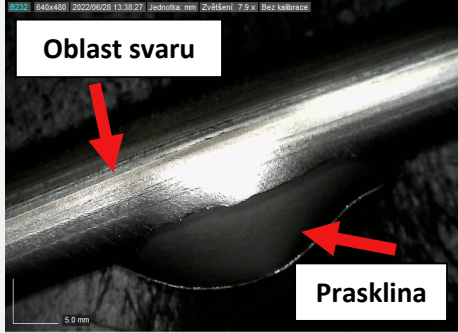
Tabulka 28 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,8 m/min

Číslo vzorku:	Počet měření	Kontrolované rozměry		
		Šířka [mm]	Výška [mm]	Délka [mm]
7.8 – 1	1	3,5	11,20	457,88
	2	3,5	11,21	457,88
	3	3,51	11,22	457,89
7.8 – 2	1	3,49	11,21	457,8
	2	3,5	11,19	457,82
	3	3,48	11,20	457,83
7.8 – 3	1	3,49	11,18	457,76
	2	3,51	11,19	457,79
	3	3,49	11,21	457,76
7.8 – 4	1	3,5	11,20	457,85
	2	3,5	11,21	457,87
	3	3,51	11,19	457,86
7.8 – 5	1	3,48	11,21	457,86
	2	3,49	11,2	457,85
	3	3,48	11,2	457,86
7.8 – 6	1	3,49	11,2	457,81
	2	3,47	11,18	457,83
	3	3,47	11,20	457,84

Z tabulky 28 je patrné, že při zvýšení rychlosti na 7,8 m/min nedošlo k žádné změně kontrolovaných rozměrů a veškeré vzorky vyhovují požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2. c).

d) Tlaková kontrola pevnosti svaru


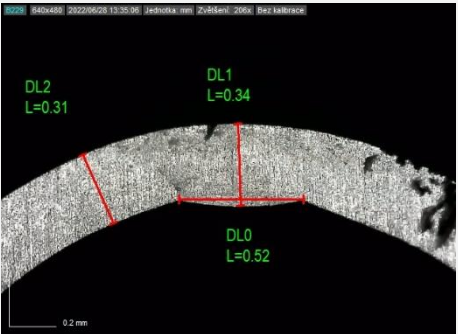


Tabulka 29 - Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,8 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.8 – 5		7.8 – 6	

Z fotografií vzorků po kontrole pevnosti svaru v tabulce 29 je patrné, že na všech trubičkách vznikla prasklina mimo oblast svaru, tudíž jsou tyto výsledky vyhovující požadavkům zmíněných v kapitole 7.2.2 d).

e) Kontrola geometrie svarového spoje v příčném řezu

Tabulka 30 - Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,8 m/min

Číslo vzorku:	Snímek	Číslo vzorku:	Snímek
7.8 – 1		7.8 – 2	
7.8 – 3		7.8 – 4	

Tabulka 31 – Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,8 m/min

Číslo vzorku:	Tloušťka stěny [mm]	Šířka kořene svaru [mm]	Výška svaru [mm]
7.8 – 1	0,31	0,55	0,33
7.8 – 2	0,31	0,52	0,34
7.8 – 3	0,32	0,49	0,35
7.8 – 4	0,32	0,50	0,35

Z naměřených hodnot výbrusů v tabulce 31 bylo zjištěno, že vzorky odpovídají zadaným podmínkám specifikovaným v kapitole 7.2.2. e) a byla tak ověřena správnost nastavených parametrů.

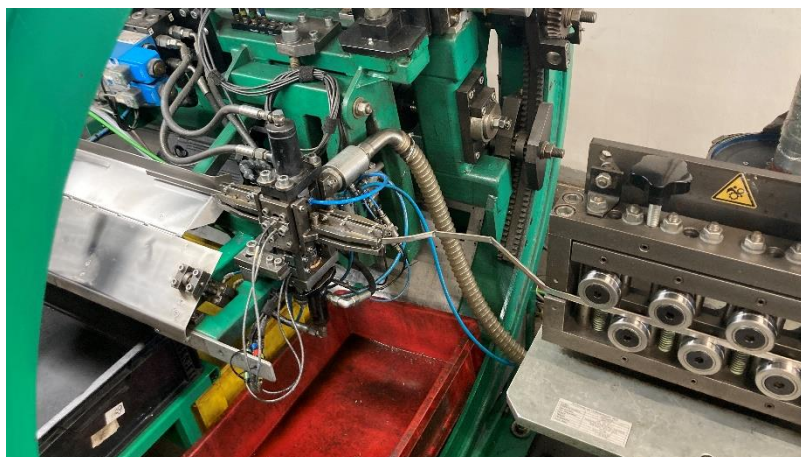
7.6. Zvýšení rychlosti na 8 m/min

Ve čtvrté části experimentu byla zvýšena výrobní rychlost na 8 m/min a výkon na 1150 W.

Tabulka 32 - Nastavené parametry při rychlosti 8 m/min

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	1150	W
Rychlost výroby	8,0	m/min
Korekce kalibrace	0,5 - 1	%
Průtok argonu – hlavní	24,7	l/min
Průtok argonu – vnitřní	16,9	l/min
Přítlak rolen	170 - 240,0	N
Teplota laseru	18 - 30	°C
Průtok chladicího média svařovací hlavy	1,5 - 2,0	l/min
Tlak demineralizované vody Svařovací hlavy	4 - 5	Bar
Spot	300	μm
Kolimace	200	mm
Fokusace	200	mm

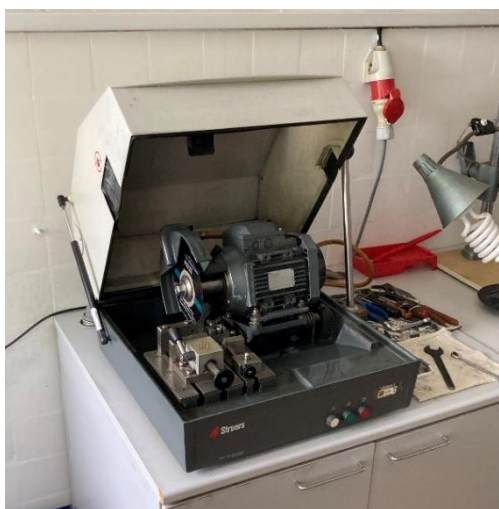
Při tomto nastavení a zvýšení rychlosti došlo k deformaci trubky u letmého dělení (viz obrázek 42). Bylo zjištěno, že stříhadlo není schopné řádně provést stříh při této rychlosti. Nemělo tedy smysl pokračovat v dalších zkouškách. Rychlost 8 m/min byla již nad kapacitu stříhadla a není tedy pro výrobu použitelná.



Obrázek 42 - Poškozená trubka ve stříhadle

8. Snímky makrostruktury

Zkouška byla prováděna na Fakultě strojní ČVUT v Praze za použití fakultních přístrojů za účelem zjištění detailních snímků makrostruktury povrchu svaru a jeho okolí a přípravy vzorků pro následné ověření vlivu rychlosti výroby na mechanické vlastnosti (měřeno zkouškou mikrotvrdomosti). Zkoušeny byly celkově čtyři vzorky, z toho byl vždy jeden vzorek vybrán po zvýšení výrobní rychlosti linky z kapitoly 7, tedy SS – 1; 7,2 – 4; 7,6 – 2 a 7,8 – 1. Nejprve byly vzorky příčně nařezány za použití vodou chlazené rozbrušovací pily Struers Labotom-3 s řezným kotoučem Struers 46A25 na přibližnou délku 4 mm. Následně byly nařezané vzorky umístěny do metalografického lisu Struers CitoPress-1 a zasypány 45 gramy MultiFast termopryskyřicí. Lis granulát pryskyřice ohřál na teplotu 180 °C po dobu 4,5 min a zalisoval tlakem 250 bar po dobu 3 min.



Obrázek 43 - Rozbrušovací pila Struers Labotom-3



Obrázek 44 - Metalografický lis Struers CitoPress-1

Dalším krokem bylo broušení a leštění výlisku se vzorky. Proces byl prováděn na metalografické brusce a leštičce Buehler Grinder-Polisher za použití několika brusných papírů s postupně zvyšující se zrnitostí.

Po leštění byly vzorky ponořeny do leptadla Portevin s chemickým složením jednoho dílu HNO_3 a třemi díly HCl po dobu přibližně 3,5 min.



Obrázek 45 - Leštička Buehler Grinder-Polisher

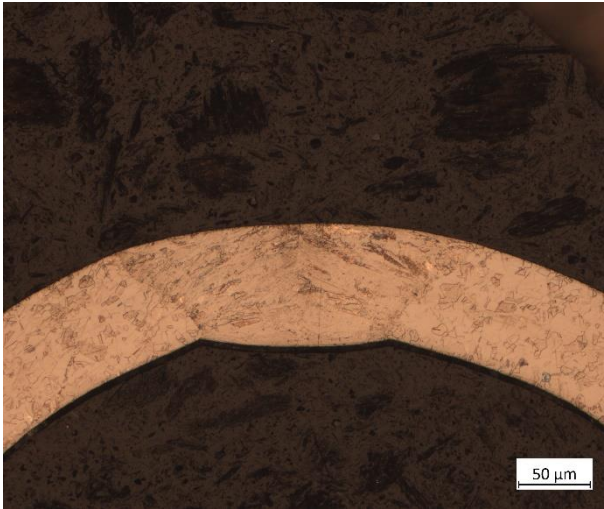


Obrázek 46 - Vyleštěný a vyleptaný výlisek se vzorky

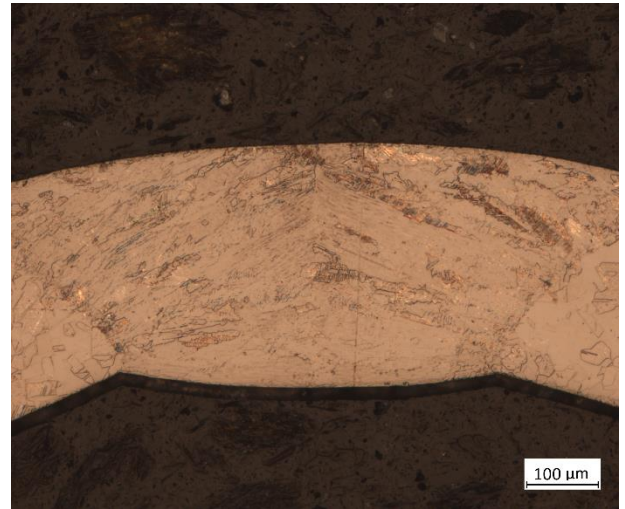
Na obrázku 46 je vidět, že při lisování došlo u krajních vzorků na základě působení tepla a tlaku k průhybu stěn. Jelikož je ale předmětem zkoušky zkoumání svarového spoje, který je umístěn v ohybu trubky, nemá na to tento fakt vliv. Posledním krokem u této zkoušky bylo uložení vzorků pod metalografický mikroskop C. Zeiss Axio Observer D1m a sledování jejich makrostruktury.



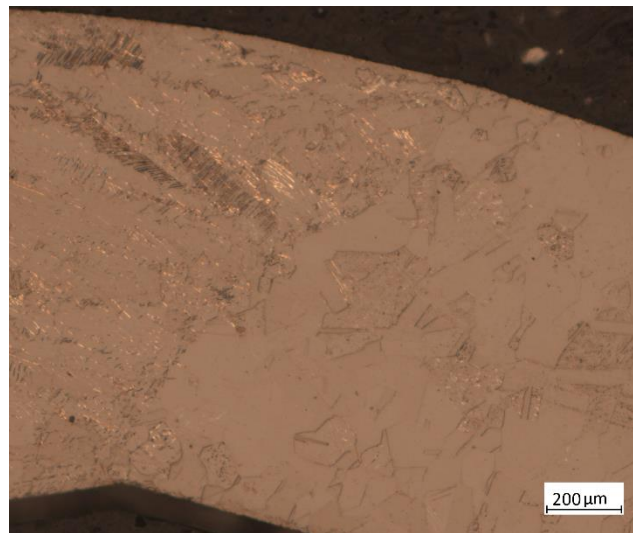
Obrázek 47 – Metalografický mikroskop C. Zeiss Axio Observer D1m



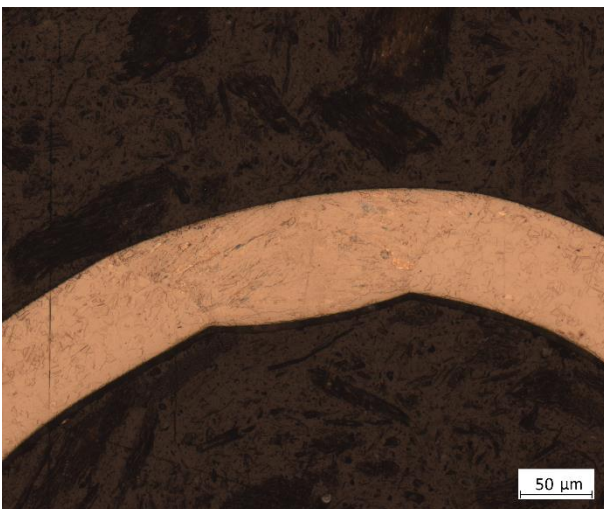
Obrázek 48 - Snímek makrostruktury vzorku SS – 1 (zvětšení 50x)



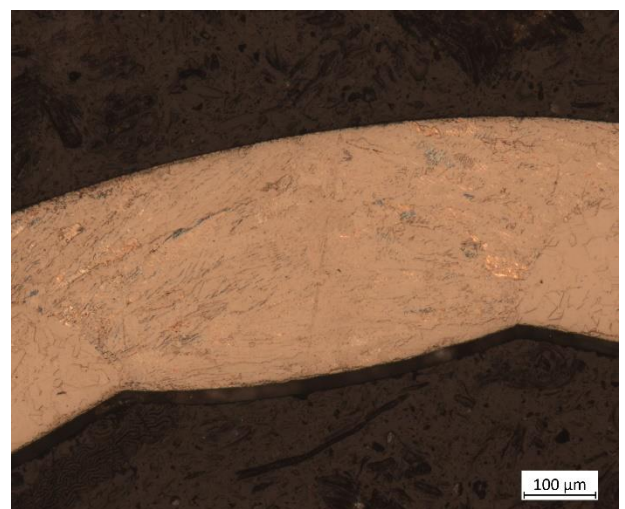
Obrázek 49 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku SS – 1 (zvětšení 100x)



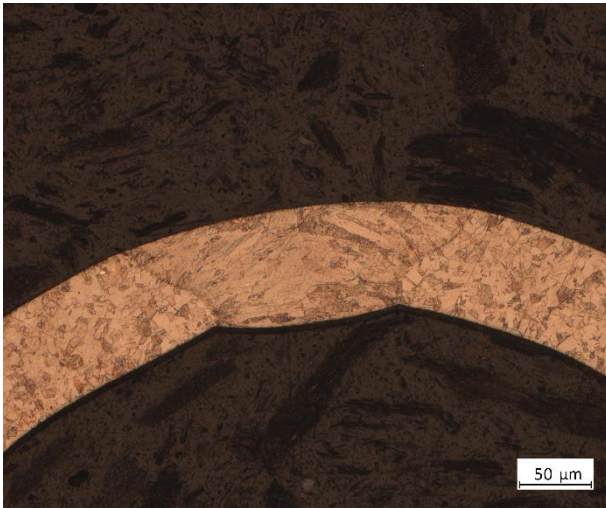
Obrázek 50 - Přejít mezi základním materiálem a svarovým spojem vzorku SS – 1 (zvětšení 200x)



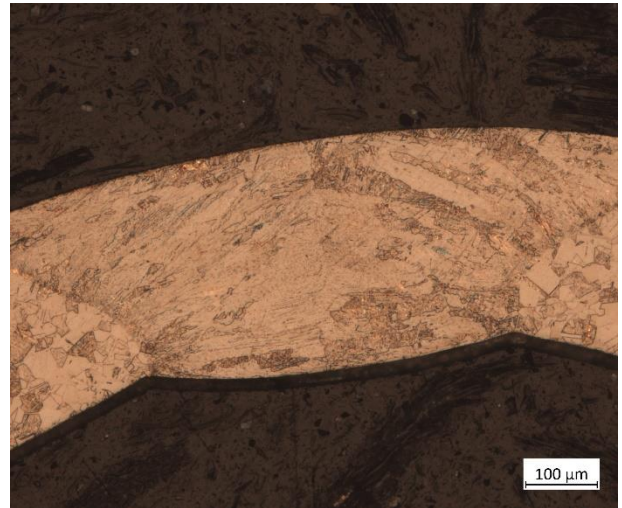
Obrázek 51 - Snímek makrostruktury vzorku 7,2 – 4 (zvětšení 50x)



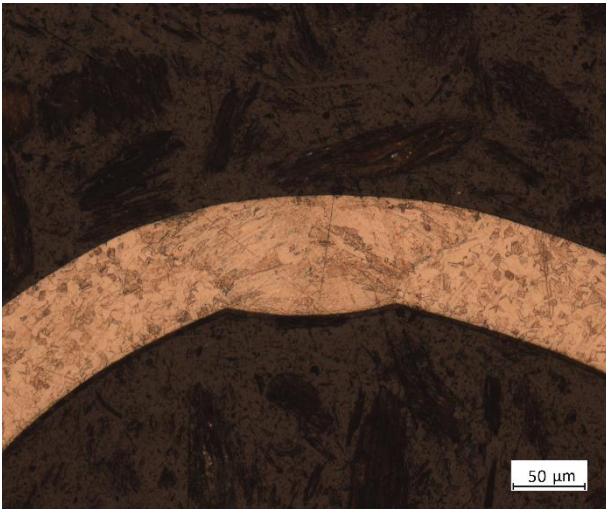
Obrázek 52 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,2 – 4 (zvětšení 100x)



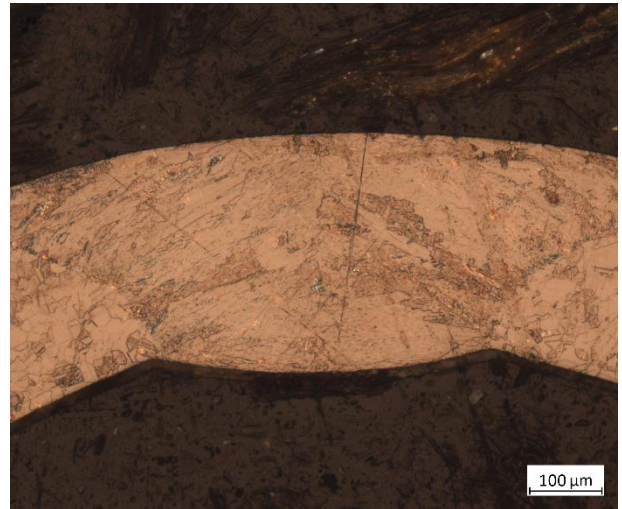
Obrázek 53 - Snímek makrostruktury vzorku 7,6 – 2 (zvětšení 50x)



Obrázek 54 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,6 – 2 (zvětšení 100x)



Obrázek 55 - Snímek makrostruktury vzorku 7,8 – 1 (zvětšení 50x)

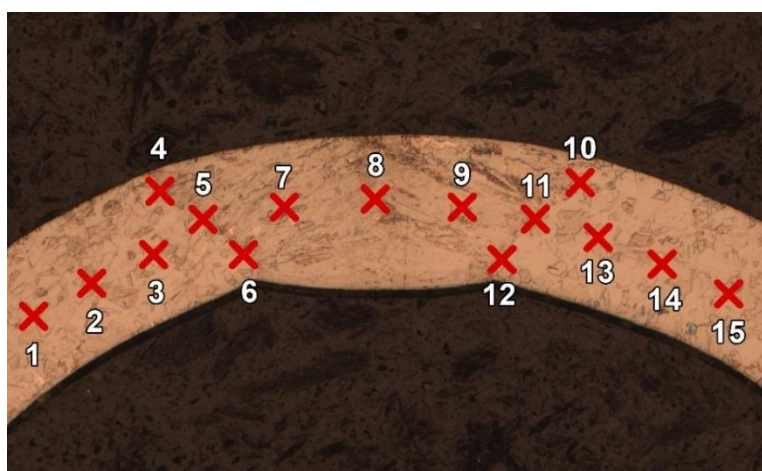


Obrázek 56 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,8 – 1 (zvětšení 100x)

Ze snímků makrostruktury bylo zjištěno, že základní materiál není ani na jednom vzorku negativně ovlivněn vytvořením svarového spoje a všechny vzorky jsou vyhovující z hlediska požadavků na kvalitu a neobsahují žádné vnitřní vady zmíněné v kapitole 6.

9. Měření mikrotvrdomosti svarových spojů na vytvořených vzorcích

Poslední část experimentu obsahuje měření a zjištění mikrotvrdomosti svarových spojů dle Vickerse za účelem ověření vlivu zvýšených parametrů svařování na mechanické vlastnosti výrobku. Měření probíhalo na půdě Fakulty strojní Českého vysokého učení technického za použití tvrdoměru Buehler IndentaMet 1104. Za účelem zjištění mikrotvrdomosti svaru bylo vytvořeno patnáct vpichů na každém vzorku, které zahrnují průběh celým svarovým spojem (obrázek 57). Vpichy 1 až 3 a 13 až 15 byly vytvořeny v základním materiálu, 4 až 6 a 13 až 15 v tepelně ovlivněných oblastech a 7 až 9 ve svarovém kovu. Měření proběhlo v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-2 - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdomosti svarových spojů. Bylo použito zatížení 200 g po dobu 10 vteřin, jde tedy o metodu HV0,2.



Obrázek 57 - Rozložení vpichů při zkoušce mikrotvrdomosti

Tabulka 33 - Měření mikrotvrdomosti vzorku SS - 1

Číslo měření	D1	D2	HV0,2	Označení oblasti
1	42,2	42,4	207,3	ZM-1 – Základní materiál
2	42,3	42,3	207,3	
3	41,1	40,3	223,9	
4	41,1	40,6	222,3	TOO-1 – Tepelně ovlivněná oblast
5	39,6	41,1	227,8	
6	42,0	42,0	210,2	
7	41,2	42,0	214,3	SK – Svarový kov
8	40,2	42,3	218,0	
9	39,1	39,9	237,7	
10	40,3	42,1	218,5	TOO-2 – Tepelně ovlivněná oblast
11	40,3	41,0	224,4	
12	40,1	41,7	221,7	
13	41,1	41,7	216,4	ZM-2 – Základní materiál
14	42,3	42,3	207,3	
15	41,8	41,7	212,8	

Poznámka: D1 a D2 = úhlopříčky vtisku indentoru; HV,02 = naměřená hodnota mikrotvrdomosti

Maximální hodnota mikrotvrdosti byla naměřena ve svarovém kovu (vpich č. 9) s hodnotou 237,7 HV0,2. Minimální hodnota mikrotvrdosti byla naměřena v základním materiálu (vpich č. 1, 2 a 14) s hodnotou 207,3 HV0,2.

Tabulka 34 - Měření mikrotvrdosti vzorku 7,2 - 4

Číslo měření	D1	D2	HV0,2	Označení oblasti
1	41,0	41,4	218,5	ZM-1 – Základní materiál
2	40,4	40,1	228,9	
3	40,5	41,4	221,2	
4	39,6	40,1	233,5	TOO-1 – Tepelně ovlivněná oblast
5	39,9	39,2	237,1	
6	39,2	39,2	241,4	
7	40,8	42,1	215,9	SK – Svarový kov
8	39,3	40,5	233,0	
9	39,0	39,9	238,3	
10	39,9	39,8	233,5	TOO-2 – Tepelně ovlivněná oblast
11	39,4	40,9	230,1	
12	39,0	39,5	240,7	
13	39,7	40,6	230,1	ZM-2 – Základní materiál
14	40,2	41,2	223,9	
15	41,0	41,7	216,9	

Poznámka: D1 a D2 = úhlopříčky vtisku indentoru; HV,02 = naměřená hodnota mikrotvrdosti

Maximální hodnota mikrotvrdosti byla naměřena v tepelně ovlivněné oblasti (vpich č. 6) s hodnotou 241,4 HV0,2. Minimální hodnota mikrotvrdosti byla naměřena ve svarovém kovu (vpich č. 7) s hodnotou 215,9 HV0,2.

Tabulka 35 - Měření mikrotvrdosti vzorku 7,6 - 2

Číslo měření	D1	D2	HV0,2	Označení oblasti
1	42,5	42,9	203,4	ZM-1 – Základní materiál
2	42,5	42,1	207,3	
3	41,5	41,5	220,6	
4	41,5	39,8	224,4	TOO-1 – Tepelně ovlivněná oblast
5	40,1	41,5	222,8	
6	41,3	40,9	219,6	
7	41,3	41,4	222,3	SK – Svarový kov
8	40,6	40,8	222,8	
9	40,6	41,3	221,2	
10	41,8	42,8	207,3	TOO-2 – Tepelně ovlivněná oblast
11	41,6	41,7	213,8	
12	41,0	41,9	215,9	
13	40,7	41,0	222,3	ZM-2 – Základní materiál
14	42,3	43,8	200,1	
15	43,1	43,1	199,7	

Poznámka: D1 a D2 = úhlopříčky vtisku indentoru; HV,02 = naměřená hodnota mikrotvrdosti

Maximální hodnota mikrotvrlosti byla naměřena v tepelně ovlivněné oblasti (vpich č. 4) s hodnotou 224,4 HV0,2. Minimální hodnota mikrotvrlosti byla naměřena v základním materiálu (vpich č. 14) s hodnotou 200,1 HV0,2.

Tabulka 36 - Měření mikrotvrlosti vzorku 7,8 - 1

Číslo měření	D1	D2	HV0,2	Označení oblasti
1	44,0	44,6	189,0	ZM-1 – Základní materiál
2	42,8	44,4	195,1	
3	43,3	43,7	196,0	
4	41,2	44,0	204,4	TOO-1 – Tepelně ovlivněná oblast
5	42,2	42,0	209,3	
6	42,0	41,3	213,8	
7	42,0	41,0	215,3	SK – Svarový kov
8	42,0	41,5	212,8	
9	40,7	40,9	222,8	
10	41,3	41,9	214,3	TOO-2 – Tepelně ovlivněná oblast
11	40,1	39,7	233,0	
12	39,2	40,6	233,0	
13	43,5	42,4	201,1	ZM-2 – Základní materiál
14	42,2	43,7	201,1	
15	44,1	43,8	192,0	

Poznámka: D1 a D2 = úhlopříčky vtisku indentoru; HV,02 = naměřená hodnota mikrotvrlosti

Maximální hodnota mikrotvrlosti byla naměřena v tepelně ovlivněných oblastech (vpichy č. 11 a 12) s hodnotou 233,0 HV0,2. Minimální hodnota mikrotvrlosti byla naměřena v základním materiálu (vpich č. 1) s hodnotou 189,0 HV0,2.

Z výsledků tohoto experimentu měření mikrotvrlosti vzorků bylo zjištěno, že zvýšení rychlosti a výkonu laseru nemá zásadní negativní dopad na mechanické vlastnosti materiálu a je tedy možné zvýšení výrobních rychlostí aplikovat.

10. Technicko-ekonomické zhodnocení výsledků

Na základě provedených experimentálních zkoušek bylo zjištěno, že zvýšení okamžité výrobní rychlosti linky na 7,2 až 7,8 m/min jsou z hlediska zvýšení efektivity výroby produktu, zajištění kvalitativních podmínek na základě zavedených kontrol společností *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje*, zkoušek makrostruktury a mikrotvrlosti vyhovující. Při zvýšení okamžité výrobní rychlosti na 8 m/min bylo zjištěno, že letmé dělení není schopné se dostatečně rychle navrátit do původní pozice a tím byla trubka zdeformována. Další kontroly tedy nebyly při této rychlosti na vzorcích prováděny. Řešením tohoto problému by bylo nahradit staré stříhadlo za nové anebo stávající stříhadlo upravit tak, aby se zvládalo při takto vysoké rychlosti navrátit do původní pozice.

Tabulka 37 - Výrobní produktivita při současném stavu (rychlost 7,0 m/min)

Rychlost výroby	Výrobní hodiny denně	Vyrobené trubky denně	Vyrobené trubky týdně	Vyrobené trubky měsíčně	Vyrobené trubky ročně
7,0 m/min	10	9180	45 900	183 600	2 203 200

V současné době firma *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* teoreticky vyrábí při rychlosti linky 7,0 m/min 2 203 200 kusů trubek ročně (viz tabulka 37).

Tabulka 38 - Výrobní produktivita při zvýšené rychlosti na 7,8 m/min

Rychlost výroby	Výrobní hodiny denně	Vyrobené trubky denně	Vyrobené trubky týdně	Vyrobené trubky měsíčně	Vyrobené trubky ročně
7,8 m/min	10	10 224	51 120	204 480	2 453 760

Po zvýšení rychlosti linky na 7,8 m/min bude společnost *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* teoreticky vyrábět 2 453 760 kusů ročně, což je nárůst výroby oproti současnému stavu o 10,2 % (viz tabulka 38).

Tabulka 39 - Tržba firmy při současném stavu (rychlost 7,0 m/min)

Rychlost výroby	Výrobní hodiny denně	Tržba denně [Kč]	Tržba týdně [Kč]	Tržba měsíčně [Kč]	Tržba ročně [Kč]
7,0 m/min	10	107 957	539 785	2 159 140	25 909 680

V současné době firma *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* teoreticky prodává jednu trubičku za 11,76 Kč, to znamená, že ročně prodává trubičky v hodnotě 25 909 680 Kč (viz tabulka 39).

Tabulka 40 - Tržba firmy při zvýšené rychlosti na 7,8 m/min

Rychlost výroby	Výrobní hodiny denně	Tržba denně [Kč]	Tržba týdně [Kč]	Tržba měsíčně [Kč]	Tržba ročně [Kč]
7,8 m/min	10	120 234	601 170	2 404 680	28 856 160

Po zvýšení rychlosti linky na 7,8 m/min a úpravě výkonu laseru bude společnost *Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje* teoreticky prodávat trubičky v hodnotě 28 856 160 Kč ročně, což je nárůst oproti současnému stavu o 2 946 480 Kč (viz tabulka 40).

11. Závěr

Bakalářská práce se zabývá technologií laserového svařování korozivzdorných austenitických ocelí.

V rešeršní části práce jsou popsány konvenční metody svařování, které se v současné době používají pro svařování zmíněného materiálu, včetně vysvětlení jejich principu, výhod, nevýhod a možností zvýšení jejich výrobní produktivity.

Další kapitoly se zabývají speciálními metodami svařování, které se pro svařování těchto materiálu používají, detailněji se práce věnuje metodě laserového svařování, kde jsou popsány typy laserů používaných v průmyslu.

Cílem práce bylo zjistit, zda je možné po zvýšení rychlosti linky a úpravě parametrů s tím souvisejícími vyrábět podélně svařované korozivzdorné trubky s vyšší produktivitou, než společnost *Atla spol. s.r.o. Továrna na stroje* v současné době vyrábí. Byly provedeny čtyři zvýšení rychlostí, při kterých bylo vytvořeno vždy šest vzorků trubek. Ty byly následně testovány na základě zavedených kontrol společnosti a jejími zákazníky. Zvýšení rychlostí na 7,2 až 7,8 m/min vyšlo po kontrolách vzorků jako vyhovující, včetně zkoušek mikrotvrdosti a makrostruktury svarového spoje.

Po zvýšení rychlosti na 8 m/min bylo zjištěno, že používané stříhadlo není schopné se při této rychlosti vrátit do původní pozice pro další stříh a materiál zdeformovalo. Řešením by bylo nahrazení tohoto stříhadla za nové, anebo úprava stávajícího stříhadla. Maximální možné parametry laserového svařování (jako stěžejní výrobní technologie zakomponované do výrobní linky), které je stávající linka schopna zpracovat z hlediska produktivity, jsou: rychlost svařování 7,8 m/min a výkon laseru 1130 W.

Na základě výsledků experimentu společnost *Atla spol. s.r.o. Továrna na stroje* zvýšením okamžité výrobní rychlosti linky ročně zvýší svou produktivitu výroby svařované trubky o 10,2 % a zároveň zvýší roční tržbu z prodeje těchto výrobků o 2 946 480 Kč více, než tomu je v současné době.

Použité literární zdroje

- [1] KŘÍŽ, Václav. *Přehled svařování: Souhrn nejvíce používaných způsobů svařování včetně pájení*. 4. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975. ISBN 04-211-71.
- [2] *Laserové svařování*. In: LaserTherm [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [3] GARWIN, Laura a Tim LINCOLN, ed. *The first laser*. In: TOWNES, Charles. *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*. 1st ed. The University of Chicago: The University of Chicago Press, 2003, 378 s. ISBN 0-226-28415-8. Dostupné z: https://press.uchicago.edu/Misc/Chicago/284158_townes.html
- [4] *SPECIFIKACE NEREZOVÝCH MATERIÁLŮ*. In: ARMAT spol. s r. o. [online]. s. 4 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [5] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí*. FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online]. FS ČVUT, s. 24 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/106030786-Svaritelnost-korozivzdornych-oceli.html>
- [6] *Material No.: 1.4307 - Mechanical properties. Woite-edelstahl.com* [online]. [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://woite-edelstahl.com/14307en.html>
- [7] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986*.
- [8] *MMA (Manual Metal Arc Welding)*. In: Automig [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma>
- [9] *Technologie svařování MMA: Obloukové svařování obalenou elektrodou - MMA*. In: Schinkmann [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mma-rucne-obalenou-elektrodou>
- [10] *MIG/MAG (CO2)*. In: Automig [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [11] JISKRA, Milan. *POROVNÁNÍ CMT TWIN S OSTATNÍMI MIG/MAG PROCESY*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [12] *TIG (Tungsten Inert Gas Welding)*. In: Automig [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/index.html>
- [13] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařování metodou TIG (WIG)*. FS ČVUT v Praze. Praha, 2016, s. 79
- [14] *Svařování pod tavidlem (SAW)*. In: SVARINFO - informační magazín o svařování [online]. 2010 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009010801>

- [15] *Schematic diagram of the submerged arc welding*. In: ResearchGate [online]. 2018 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-submerged-arc-welding-presenting-a-system-elements-b-the_fig1_326941280
- [16] KUBÍČEK, Jaroslav. *SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ*. In: VUT v Brně - Fakulta strojního inženýrství [online]. Brno, s. 69 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf
- [17] KRÁLOVÁ, Magda. *PLAZMA* [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/plazma>
- [18] MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. VUT v Brně, 2013 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf
- [19] KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektronové svařování - perspektivní metoda pro speciální materiály* [online]. 2016 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy>
- [20] M. STEEN, William. *Laser Material Processing*. 4th ed. Springer London Dordrecht Heidelberg New York: Springer-Verlag London Limited, 2010. ISBN 978-1-84996-061-8.
- [21] KOŘÁN, Pavel. *SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING)*. Lao.cz [online]. 2013 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [22] KATAYAMA, Seiji, ed. *Handbook of laser welding technologies*. 1st pub. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9.
- [23] *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red*. Lt.cz [online]. [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [24] HECHT, Jeff. *Fundamental principles*. Britannica [online]. [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser/Laser-applications>
- [25] KOLAŘÍK, Ladislav. *Průmyslové laserové systémy pro svařování*. ČVUT v Praze - Fakulta Strojní. 2021, s. 88.
- [26] DUŠEK, Jiří. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. Mega-blog.cz [online]. 2013 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>

- [27] NOVÁK, Václav. *OPTIMALIZACE PROCESNÍCH PARAMETRŮ LASEROVÝCH SVARŮ NA VAGÓNECH VE FIRMĚ BOMBARDIER TRANSPORTATION*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci - Fakulta strojní. Vedoucí práce Jaromír Moravec.
- [28] GIESEN, Adolf. *Thin Disk Lasers: Power scalability and beam quality*. In: Laser-journal.de [online]. s. 4 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: https://application.wiley-vch.de/berlin/journals/ljtj/05-02/LTJ02_42_45.pdf
- [29] NOVÁK, Miroslav. *Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi*. *Mmspektrum.cz* [online]. [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
- [30] KUSALA, Jaroslav. *Typy laserů* [online]. 2004 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [31] *Rozdělení laserů*. *Lascam.cz* [online]. 2015 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [32] STEIDL, Petr. *Srovnání CO2 a pevnolátkových laserů (svařování)*. Praha: Trumpf, 2021.
- [33] KOLAŘÍK, Ladislav. *Nedestruktivní zkoušení*. FS ČVUT v Praze.
- [34] *TRUMPF TruDisk Flyer*. *Trumpf.com* [online]. s. 4 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Lasers/02_Brochures/TRUMPF-TruDisk-Flyer-EN.PDF

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Specifikace rozměrů profilu trubky	11
Obrázek 2 - Podélně svařovaná korozivzdorná trubka.....	11
Obrázek 3 - EGR výměník	11
Obrázek 4 - Schéma svařování metodou MMA [5]	12
Obrázek 5 – Principiální schéma hoření elektrického oblouku u metody MMA [9]	13
Obrázek 6 – Schéma svařování metodou MIG/MAG [10].....	14
Obrázek 7 – Schéma svařování metodou TIG [12]	16
Obrázek 8 - Schéma svařování metodou SAW [15].....	17
Obrázek 9 - Rozdíl mezi metodou svařování TIG a svařování plazmatem (PAW)	19
Obrázek 10 - Princip elektronového svařování [19].....	21
Obrázek 11 - Absorbce a emise záření [25].....	23
Obrázek 12 – Spontánní a stimulovaná emise záření [25]	23
Obrázek 13 – Schéma optického rezonátoru pevnolátkového laseru [21].....	24
Obrázek 14 - Princip vzniku laserového paprsku [21]	24
Obrázek 15 - Uspořádání jednotlivých laserových diod do tyčinky [27].....	25
Obrázek 16 - Konstrukce LPSS Nd:YAG laseru [26]	25
Obrázek 17 - Diodami bočně buzený DPSS Nd:YAG laser [26].....	26
Obrázek 18 - DPSS Nd:YAG laser se zadním diodovým buzením [26].....	26
Obrázek 19 - Princip diskového laseru [28].....	26
Obrázek 20 - Princip vláknového laseru [26].....	27
Obrázek 21 - Princip plynového laseru [16]	28
Obrázek 22 - Konstrukce plošného difúzí chlazeného CO ₂ slab laseru [26].....	28
Obrázek 23 - Podélná trhлина [33]	29
Obrázek 24 - Vnitřní póry [33].....	29
Obrázek 25 - Struskové vměstky [33].....	30
Obrázek 26 - Neprůvar kořene koutového svaru [33]	30
Obrázek 27 - Příklady vad tvaru a rozměru [33]	31
Obrázek 28 – Rozstřík [33]	31
Obrázek 29 - Výrobní linka S2	32
Obrázek 30 - Výkres výrobní linky (popis a vysvětlení je uvedeno v kapitole 7.1.).....	33
Obrázek 31 - Přípravek pro kontrolu ohybu trubky	37
Obrázek 32 - Kontrola vytvořených vzorků na ohyb	37
Obrázek 33 - Rozměry polotovaru	38
Obrázek 34 - Vzorek uložený v přípravku na měření	39
Obrázek 35 - Měření vytvořených vzorků	39
Obrázek 36 - Pracoviště pro přípravu vzorku na provedení tlakové kontroly pevnosti svaru	40
Obrázek 37 - Přípravek pro vytvoření kuželovitého konce trubky.....	40
Obrázek 38 - Pracoviště pro provádění kontroly pevnosti svaru	40
Obrázek 39 - Pracoviště pro provedení příčného řezu a výbrusu trubky.....	41
Obrázek 40 - Vzorky připravené ke zkoušce pro kontrolu geometrie svaru	41
Obrázek 41 - Mikroskop DinoLite.....	42
Obrázek 42 - Poškozená trubka ve stříhadle	53
Obrázek 43 - Rozbrušovací pila Struers Labotom-3	53

Obrázek 44 - Metalografický lis Struers CitoPress-1	53
Obrázek 45 - Leštička Buehler Grinder-Polisher	54
Obrázek 46 - Vyleštěný a vyleptaný výlisek se vzorky.....	54
Obrázek 47 – Metalografický mikroskop C. Zeiss Axio Observer D1m	54
Obrázek 48 - Snímek makrostruktury vzorku SS – 1 (zvětšení 50x)	55
Obrázek 49 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku SS – 1 (zvětšení 100x)	55
Obrázek 50 - Přejechání mezi základním materiálem a svarovým spojem vzorku SS – 1 (zvětšení 200x) ..	55
Obrázek 51 - Snímek makrostruktury vzorku 7,2 – 4 (zvětšení 50x).....	55
Obrázek 52 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,2 – 4 (zvětšení 100x)	55
Obrázek 53 - Snímek makrostruktury vzorku 7,6 – 2 (zvětšení 50x).....	56
Obrázek 54 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,6 – 2 (zvětšení 100x)	56
Obrázek 55 - Snímek makrostruktury vzorku 7,8 – 1 (zvětšení 50x).....	56
Obrázek 56 - Detailnější snímek makrostruktury vzorku 7,8 – 1 (zvětšení 100x)	56
Obrázek 57 - Rozložení vpichů při zkoušce mikrotvrdosti	57

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení základního materiálu – oceli 1.4307 [4].....	10
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti materiálu [6]	11
Tabulka 3 - Charakteristika a rozsah použití MMA [7]	12
Tabulka 4 - Charakteristika a rozsah použití metody MIG/MAG [7]	14
Tabulka 5 - Charakteristika a rozsah použití TIG [7].....	15
Tabulka 6 - Charakteristika a rozsah použití [7]	17
Tabulka 7 - Přibližné průměrné teploty plazmatu při použití různých typů plazmových plynů [16]	20
Tabulka 8 - Typy a charakteristika laserů pro svařování [22] [23]	22
Tabulka 9 - Porovnání diskového a CO ₂ laseru [32]	28
Tabulka 10 - Technická specifikace laseru Trumpf – 2kW – TruDisk 2002 [34]	35
Tabulka 11 - Parametry výrobní linky při současné výrobě	36
Tabulka 12 - Barevná škála pro kontrolu oxidace povrchu svaru	38
Tabulka 13 - Naměřené rozměry při zjišťování aktuálního stavu výroby.....	39
Tabulka 14 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby	41
Tabulka 15 – Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby.....	42
Tabulka 16 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při zjišťování aktuálního stavu výroby.....	43
Tabulka 17 - Nastavené parametry při rychlosti 7,2 m/min	43
Tabulka 18 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,2 m/min	44
Tabulka 19 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,2 m/min.....	45
Tabulka 20 – Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,2 m/min	45
Tabulka 21 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,2 m/min	46
Tabulka 22 - Nastavené parametry při rychlosti 7,6 m/min	46
Tabulka 23 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,6 m/min	47
Tabulka 24 – Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,6 m/min.....	48
Tabulka 25 - Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,6 m/min	48
Tabulka 26 - Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,6 m/min	49
Tabulka 27 - Nastavené parametry při rychlosti 7,8 m/min	49
Tabulka 28 - Naměřené rozměry při rychlosti 7,8 m/min	50
Tabulka 29 - Vzorky po tlakové kontrole pevnosti svaru při rychlosti 7,8 m/min	51
Tabulka 30 - Snímky makrostruktury trubek po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,8 m/min	51
Tabulka 31 – Vyhodnocení vzorků po kontrole geometrie svaru při rychlosti 7,8 m/min.....	52
Tabulka 32 - Nastavené parametry při rychlosti 8 m/min	52
Tabulka 33 - Měření mikrotvrdosti vzorku SS - 1	57
Tabulka 34 - Měření mikrotvrdosti vzorku 7,2 - 4.....	58
Tabulka 35 - Měření mikrotvrdosti vzorku 7,6 - 2.....	58
Tabulka 36 - Měření mikrotvrdosti vzorku 7,8 - 1.....	59
Tabulka 37 - Výrobní produktivita při současném stavu (rychlost 7,0 m/min).....	60
Tabulka 38 - Výrobní produktivita při zvýšené rychlosti na 7,8 m/min	60
Tabulka 39 - Tržba firmy při současném stavu (rychlost 7,0 m/min).....	60
Tabulka 40 - Tržba firmy při zvýšené rychlosti na 7,8 m/min	60

Seznam zkratek

MKK – Mezikrystalická korozie

WPS – Welding Procedure Specification – Specifikace svařovacího procesu

EGR – Exhaust Gas Recirculation – Recirkulace výfukových plynů

MMA – Manual Metal Arc – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

MIG – Metal Inert Gas – Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu

MAG – Metal Active Gas – Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu

TIG – Tungsten Inert Gas – Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu

SAW – Submerged Arc Welding – Svařování pod tavidlem

PAW – Plasma Arc Welding – Plazmové obloukové svařování

VF – Vysokofrekvenční

EBW – Electron Beam Welding – Svařování elektronovým paprskem

DPSS laser – Diode Pumped Solid State laser – Diodami buzený pevnolátkový laser

LPSS – Lamp Pumped Solid State – Výbojkami buzený pevnolátkový laser

SS – Současný stav

HV – Hardness Vickers – Tvrdost dle Vickerse