



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# POROVNÁNÍ SVAŘOVÁNÍ RUČNÍM LASEREM A TIG METODOU

COMPARISON OF MANUAL LASER AND TIG WELDING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Černý

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2023

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jan Černý</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jaroslav Kubiček, IWE</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Porovnání svařování ručním laserem a TIG metodou

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Robotické svařování laserem je v dnešní době již běžně používaná technologie v celé řadě průmyslových odvětví včetně velkých loděnic. Svařování ručním laserem je naopak počínající a rozvíjející se technika využití laserového záření ve spojování tenkých plechů. DP je zaměřena na technologické a ekonomické porovnání ručního svařování laserem a metody TIG u korozivzdorných ocelí.

### Cíle diplomové práce:

- vypracování literární studie zaměřené na řešenou problematiku
- výběr typu laserového zařízení a svařované korozivzdorné oceli
- provedení experimentu
- technické a ekonomické vyhodnocení svarových spojů

### Seznam doporučené literatury:

ASM handbook: Welding, brazing, and soldering. Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

BENKO, B. a kol. Laserové technológie. Technická universita, Bratislava, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

TURŇA, M. Špeciálne metódy zvrania. 1. vyd. ALFA Bratislava, 1989. ISBN 80-05-000097-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 1999. 249 s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2000. 214 s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá porovnáním svařovacích metod TIG (141) a nekonvenční metody ručního laserového svařování (521) tenkých plechů z korozivzdorné oceli X5CrNi 18-10. Cílem práce je zjistit rozdíl kvality mezi vybranými metodami na vyhotovených svarech a vypracovat technicko ekonomické zhodnocení. V diplomové práci je na začátku rozebrána literární studie se zaměřením na princip jednotlivých metod svařování, možných vad vzniklých při svařování a svařitelnosti jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí. V experimentální části je rozebrán návrh experimentu, který spočíval ve svaření vzorků vybraných svarových spojů pomocí jednotlivých technologií. Poté byly svary pomocí nedestruktivních a destruktivních zkoušek vyhodnoceny. Na závěr bylo propočítáno i ekonomické zhodnocení obou technologií a návratnost zařízení.

### **Klíčová slova**

ruční laserové svařování, korozivzdorné oceli, TIG, zkoušky svarů, ekonomie svařování

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the comparison of TIG welding methods (141) and unconventional methods of manual laser welding (51) of thin sheets of stainless steel X5CrNi 18-10. The goal of the thesis is to determine the difference in quality between the selected methods on the welds made and to develop a technical and economic evaluation. At the beginning of the diploma thesis, a literary study is analyzed with a focus on the principle of individual welding methods, possible defects arising during welding and the weldability of individual types of stainless steels. In the experimental part, the design of the experiment is discussed, which consisted in welding samples of selected weld joints using individual technologies. The welds were then evaluated using non-destructive and destructive tests. Finally, the economic evaluation of both technologies and the return of the equipment were also calculated.

### **Keywords**

handheld laser welding, stainless steels, TIG, welding tests, welding economics

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČERNÝ, Jan. *Porovnání svařování ručním laserem a TIG metodou* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149289>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Porovnání svařování ručním laserem a TIG metodou vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

V Příbyslavi 24.5.2023

---

Bc. Jan Černý

---

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jaroslavovi Kubíčkoví, IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl a byly mi velkou pomocí při vypracování diplomové práce. Zároveň bych rád poděkoval své nejbližší rodině, která mi byla oporou po celou dobu magisterského studia a při vypracovávání této diplomové práce.

---

**OBSAH**

Zadání práce  
Abstrakt

Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Možnosti řešení.....	10
2 SVAŘOVACÍ TECHNOLOGIE.....	12
2.1 Metoda TIG .....	12
2.1.1 Princip metody TIG .....	12
2.1.2 Druhy svařovacích proudů .....	14
2.1.3 Svařovací zařízení .....	15
2.2 Svařování laserem.....	18
2.2.1 Vlastnosti laserového paprsku .....	19
2.2.2 Princip laserového svařování .....	20
2.2.3 Rozdělení typu laserů.....	25
2.3 Porovnání ručního laserového svařování a TIG .....	28
2.4 Vady svarů .....	28
2.5 Korozivzdorné oceli, vlastnosti a rozdělení.....	31
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	36
3.1 Návrh experimentu .....	36
3.1.1 Svařovací zařízení .....	37
3.1.2 Svařovaný materiál .....	39
3.2 Vizuální kontrola .....	41
3.3 Makroskopie svarů.....	43
3.4 Tahová zkouška .....	48
3.5 Zkoušky tvrdosti .....	52
4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	55
4.1 Technické zhodnocení .....	55
4.2 Ekonomické zhodnocení.....	56
4.2.1 Náklady na svařování technologií laserového paprsku.....	57
4.2.2 Náklady na svařování technologií TIG .....	59
4.2.3 Souhrn nákladů a návratnost investice.....	61
5 ZÁVĚR.....	62

Seznam použitých zdrojů  
Seznam použitých symbolů a zkratk  
Seznam příloh

## ÚVOD

Svařování tenkých plechů je problém i pro zkušené svářeče, jelikož běžné zavedené nastavení svařovacího zařízení zde neplatí. Při špatně zvoleném svařovacím proudu se může materiál lehce propálit, a to zapříčiní vzniku propalů, nebo naopak nedostatečného průvaru. S nízkým proudem je spojeno i tvorba krátkého svarového oblouku, který je často nestabilní a vyžaduje velkou zručnost svářeče. Svařování velkých konstrukcí s velkou tloušťkou stěny s předepsanými požadavky na mechanické vlastnosti není svaření dílů pro svářeče až takový problém, ale nastavení svařovacího zařízení pro tenké plechy je o dost komplikovanější a je potřeba využít zkušeností nebo experimentovat a hledat správné nastavení technologie před svařením požadovaného dílce. Často se ale tenké plechy používají jako krycí pohledové plechy nosných konstrukcí, jako designové prvky spotřebního zboží nebo uměleckých plastik jako je vidět na obr.1 a kovových prvků osvětlení. Proto je kladen velký důraz na kvalitu povrchu svaru spolu s dosažením určitých mechanických vlastností pro zajištění bezpečnosti konstrukce a rychlosti výroby. Svařování laserem je již běžně zavedená technologie ve velkosériových výrobcích, kde je již značný stupeň automatizace a výrobní čas zde hraje největší roli. V kombinaci s robotizovaným ramenem je svařování pomocí laseru velmi dobrá volba z důvodu rychlosti svařování (až  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , TIG pouze  $180 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a dosažení velmi kvalitního spoje. Aplikace ručního laserového svařování je zavádějící metodou v malosériových a zakázkových výrobcích, kde nachází časté využití pro svařování pohledových dílců. S vlastnostmi laserového paprsku a jeho dobrého nastavení je možné vytvářet i velmi kvalitní pevnosti svarové spoje. Oproti konvekčním metodám svařování se při použití laserového paprsku snižují technologické přestávky, zrychluje výroba, a dokonce se i snižují nároky na přípravu svařovaných dílů již při konstrukci sestavy svařence (přípravkování, upínání).



Obr.1 Umělecká plastika z korozivzdorné oceli [44].

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Dnes je možné svařovat i různé materiály s požadovanou kvalitou a přesností. Tyto aplikace jsou používány pouze ve speciálním odvětví průmyslu (např. technologie svařování CMT), naopak v běžné průmyslové praxi se setkáváme se základními typy materiálů jako je konstrukční ocel a korozivzdorná ocel. Právě ta s sebou nese náročné přípravy při svařování vzhledem k jejím vlastnostem. Vyznačuje se tepelnou roztažností, vyšším elektrickým odporem ale menší tepelnou vodivostí. Korozivzdorné oceli se dle obsažených legur rozdělují a musí se ke každé přistupovat individuálně, všeobecně existují pravidla a doporučení, která platí pro zlepšení svařitelnosti jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí.

Tato diplomová práce se přímo zabývá porovnáním technologie svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranném plynu (TIG/GTAW) a ruční laserové svařování v zakázkové výrobě firmy XY, která plánuje pořízení laserového svařovacího zařízení jako náhradu TIG pro zefektivnění procesu výroby. Pro účely této práce bylo zde umožněno vytvoření svarových vzorků pro samotné porovnání. Pro svařování byl vybrán materiál korozivzdorná austenitická ocel 1.4301 (AISI 304, X5CrNi18-10) s tloušťkou 2 mm, která se vyznačuje vysokou odolností proti korozi a je velmi vhodná pro svařování nebo i tváření za studena. Po svaření základních typů svarů budou svary zkoušeny a podrobeny porovnání mechanických vlastností s následným ekonomickým zhodnocením.

### 1.1 Možnosti řešení

Pro svařování korozivzdorných ocelí se při ručním svařování nejčastěji používají tyto metody svařování MIG/MAG, MMA, TIG a nově zaváděnou technologií je laserové svařování. Pro celosvětové jednotné označení se metody označují normou ČSN EN ISO 4063. Každá z vyjmenovaných technologií přináší pro svařence určité výhody a nevýhody, které jsou popsány zde: [2; 3; 11; 12; 14; 51]

- MIG/MAG 131/135 – nejpoužívanější postup svařování vzhledem k vlastnostem a principu svařování, který lze jednoduše automatizovat. Pro ruční vedení svarového oblouku vyžaduje nižší nároky na obsluhu, vykazuje vysoké rychlosti svařování a využívá se spíše na pevnostní spoje nosných konstrukcí kde materiály dosahují velkých tlouštěk. Dle použité ochranné atmosféry se název liší, tj. MIG – inertní plyn, MAG – aktivní plyn. Samotná volba plynu poté ovlivňuje kvalitu svaru. Schéma svařování technologií MIG/MAG je zobrazeno na obr. 2.



Obr. 2 Technologie svařování MIG [14].

MMA 111 – nejstarší metoda obloukového svařování, která díky flexibilitě a možnosti svařování v různých polohách a se snadnou dostupností svařovacích zdrojů zaujímá stále svoji pozici. Využívá se převážně na lokální opravy na montážích a požaduje velkou zručnost svářeče. Kvalitou svaru se blíží k technologii TIG, ale její nevýhodou je velké množství vneseného tepla. Svary dosahují vysokých mechanických hodnot. Pro svařování se používají obalované elektrody nebo trubičkové dráty jako je vidět na obr. 3.



Obr. 3 Technologie svařování MMA [14].

- TIG 141 – dominantou této technologie je široká paleta materiálů, které je možné touto technologií svařit. Mezi nejčastěji svařované materiály patří slitiny hliníku, hořčíku a korozivzdorné oceli. Právě u nich se TIG vyznačuje jednoduchým ovládním a řízením procesu pro tvorbu kvalitního svaru. Svařování požaduje určitou zručnost svářeče a díky tomu vznikají velmi kvalitní a pevnostní svary napříč různým tloušťkám materiálu. Její hlavním využitím je pro tenké plechy. Ukázka svařování metodou TIG je vyobrazena na obr. 4.



Obr. 4 Technologie svařování TIG [14].

- Laserové svařování 52 – rozšiřující se technologie svařování převážně v automatizovaném průmyslu výroby, kde se využívá možnosti nastavení konfigurace svazku ke svařování různých typů materiálu bez přídavného materiálu jako jsou např. plasty nebo oceli. Velkou výhodou je schopnost vnesení velké energie do místa svaru s minimálním TOO, tuto energii lze i rozprostřít do plochy a využít ji k navařování nebo k povrchovému legování. Ruční svařování pomocí laserového paprsku, které je vidět na obr. 5, se začíná používat v praxi, ale vyžaduje velkou zručnost svářeče, znalost procesu a nastavení samotného zařízení. Lze kombinovat s přídavným materiálem nebo bez.



Obr. 5 Technologie svařování laserovým paprskem [14].

---

## 2 SVAŘOVACÍ TECHNOLOGIE

V praxi se při svařování tenkých plechů využívá převážně technologie svařování metodou TIG z důvodu „ jednoduché “ aplikace, dobrého vedení elektrického oblouku a tím i vedení a kontrola svarového spoje. Při svařování zde ale dochází k velkým deformacím skrze vnesené teplo od elektrického oblouku, který následně ovlivňuje výsledný tvar svařence (tj. dochází k teplotním deformacím a zvlněním plechů). Aby se tomuto předcházelo, musí se stanovovat technologické přestávky na vychladnutí a svarové spoje dělat na více operací, nebo po svaření na jeden průchod svařenec mechanicky „ narovnat “ do původního tvaru. Pokud takto plech upravujeme hrozí poškození výsledného svařence, v celkovém součtu tyto procesy ovlivňují celkovou dobu výroby, a tím i zdražují celý výrobní proces. Právě tomuto lze předcházet za použití laserového paprsku, který vykazuje minimální TOO díky zaostření energie do velmi malého bodu nebo plochy (tj. do místa svaru). Na základě usměrnění paprsku do místa svaru vzniká velmi kvalitní svar s požadovanou kvalitou a průvarem. Při svařování je možné připojit i podavač drátu a svařovat s přídavným materiálem pro ještě lepší vlastnosti svaru. Avšak technologie laserového paprsku pro ruční svařování je teprve v počátcích své aplikace, výraznější rozmach aplikace laserového paprsku je v kombinaci s robotickým ramenem v automatizovaných linkách (např. remote welding v automobilovém průmyslu), které paprsek navede přesně do místa, kde je potřeba.

### 2.1 Metoda TIG

Celým názvem v anglickém termínu Tungsten inert gas (Tungsten – wolfram, Inert – inertní, Gas – plyn), kde jeho zkratka je mezinárodně uznávaný název dle svářečské komise IIW, v americké normě označujeme GTAW a v německé WIG. Blíže je název svařování netavicí se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře. Je považována za jednu z nejrozšířenějších metod svařování ve strojírenském průmyslu. Tato metoda poskytuje velmi dobrou kontrolu nad svarovou lázní, jednoduché nastavení svařovacích podmínek, dobrou manipulovatelnost a dovoluje svařovat v různých polohách. Při dobré zručnosti svářeče vzniká velmi kvalitní svar s vysokou jakostí povrchu svaru, dobrým kořenem, a dokonce je možno i svary jednoduše vrstvit. Výsledný svar má velmi dobré mechanické a zaručuje i fyzikálně chemické vlastnosti. [2; 3; 7; 15]

#### 2.1.1 Princip metody TIG

Svařování metodou TIG se řadí mezi metody tavného svařování, které probíhá při vysokých teplotách (teplota oblouku v oblasti 6500 °C – 9000 °C) a je možné svařovat s přídavným materiálem nebo bez. Zdrojem tepla je zde elektrický oblouk, který hoří mezi wolframovou elektrodou a základním svařovaným materiálem. Pracovní teplota, kterou produkuje oblouk je vyšší než teplota tavení základního a přídavného materiálu. Celý proces probíhá v ochranné atmosféře inertního (netečného) plynu, který se nepodílí chemicky na tvorbě svarové housenky. Slouží primárně k ochranně svarové lázně od okolní atmosféry, k lepší stabilitě elektrického oblouku a pro zlepšení zápalu. Svarovou lázeň tvoříme pomocí svařovacího hořáku, který je ovládán svařovacím operátorem nebo může být zmechanizován pomocí robotického ramene. [2; 3; 7; 15]

#### Přídavné materiály

Plní několik funkcí při svařování, např: doplňují objem svarové lázně při velké svarové mezeře, legují svarovou housenku a zlepšují mechanické vlastnosti svaru nebo nahrazují prvky které při svařování zmenšily svoji koncentraci. V neposlední řadě přídavný materiál zlepšuje formování

samotného svaru a operativnost při svařování v polohách. Přídavné materiály jsou dodávány ve tvaru tyčky, ty se používají při ručním svařování a drátu pro strojní svařování. [7; 12]

- Svařovací tyčky – dráty o průměru 0,8-8 mm v délkách 600-1000 mm, plného průřezu [7]
- Svařovací dráty – dráty navinuté na cívkách v průměru 0,6-2,4 mm (pro navařování do průměru 5 mm) [7]

Volba správného přídavného drátu musí splňovat několik zásad: [7; 12]

- stejné (nebo velmi podobné) chemické složení jako svařovaný základní materiál
- při dynamicky namáhané konstrukci musí být zvolen přídavný materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi než základní materiál
- pokud svařujeme materiály citlivé na horké trhliny je potřeba volit přídavný materiál snižující tento jev
- při svařování korozivzdorných ocelí je nutné použít přídavné materiály se stejným chemickým složením a čistotou jako základní materiál

### Ochranné plyny

Hlavním úkolem ochranného plynu při svařovacím procesu je stabilizování oblouku a ochrany elektrody a svarové lázně před okolní atmosférou. Usnadňují zápal oblouku a pomáhají přenosu tepla do svaru. Nejčastěji používanými druhy ochranných plynů jsou Argon, Helium a jejich kombinace. Vliv použitých plynů na kvalitu svaru je vyobrazeno na obr. 6. [7]

#### Argon

Nejčastěji používaný plyn s chemickou značkou Ar, který je levný, bez barvy, chuti a zápachu. Je to inertní plyn, který nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Hustota plynu je  $1,784 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Má malou vodivost a nízký ionizační potenciál (15,8 eV), díky čemuž dobře zapaluje oblouk, má vysokou stabilitu i při velké délce a pomáhá dosahovat vysokých teplot. Běžně používaná čistota plynu je značena 4.6 tj. 99,996 % Ar. Pro materiály s vysokou afinitou ke kyslíku se používají čistoty 99,998 % (označujeme 4.8) a 99,999 % (označujeme 5.0). Dle normy je označován ISO 14175:I2. [7; 12]

#### Helium

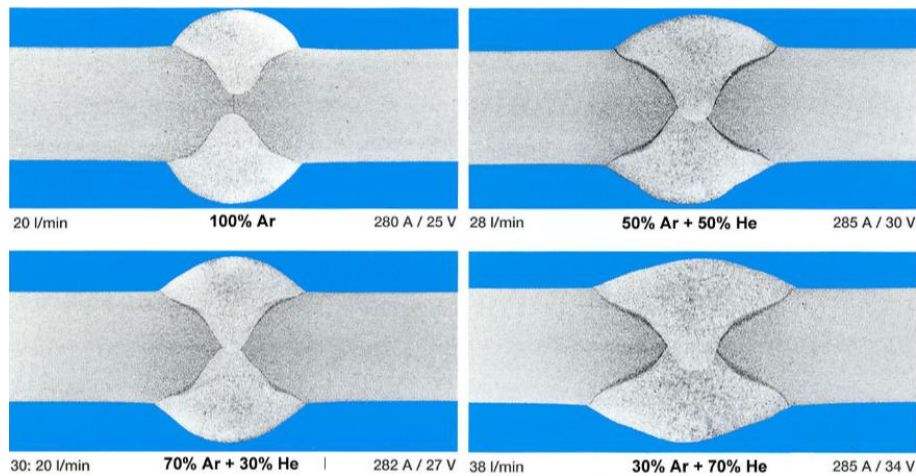
Inertní, jednoatomový plyn s chemickou značkou He je plyn bez chuti, zápachu a barvy s velmi malou hustotou  $0,178 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což určuje jeho horší ochranné vlastnosti. Pro zachování dostatečné ochrany svarové lázně je nutné zvýšit průtok plynu svařovacím hořákem, vzhledem k tomu je použití samotného plynu oproti Argonu neekonomické. Stejně jako Argon se Helium vyrábí ve vysoké čistotě (tj. 99,996 % které označujeme 4.6) s limitovaným obsahem kyslíku a dusíku (5-20 ppm). Oproti Argonu má Helium větší tepelnou vodivost i ionizační potenciál (tj. 24,6 eV), kvůli čemuž je složitější vytvořit zápal a hoření je nestabilní při větší délce hoření. Dle normy je označován ISO 14175:I3. [7; 12]

#### Směs Argonu a Helia

Směsí těchto plynů tvoří samostatnou skupinu ochranných inertních plynů. Díky správně zvoleným poměrům plynů získáváme výhodné vlastnosti obou plynů, a tím dosahujeme lepších výsledků při TIG svařování. S rostoucím obsahem Helia roste tepelný výkon oblouku a napětí na oblouku což pozitivně ovlivňuje tvar a rozměr svarové housenky. Díky kombinaci plynů se všeobecně zvyšuje rychlost svařování a hloubka závaru. Směsi se pro výrobu dodávají již namíchané dle požadavku a není potřeba směšovacího zařízení na pracovišti. Použití směsi se využívá na svařování materiálů jako je měď a slitiny hliníku, kde za použití směsi plynů je zaručena vyšší rychlost svařování oproti hliníku. [7; 12]

Nejčastěji se používají tyto směsi: [7]

- 70 % Ar + 30 % He
- 50 % Ar + 50 % He
- 30 % Ar + 70 % He



Obr. 6 Vliv použitých ochranných plynů na kvalitu svaru [15].

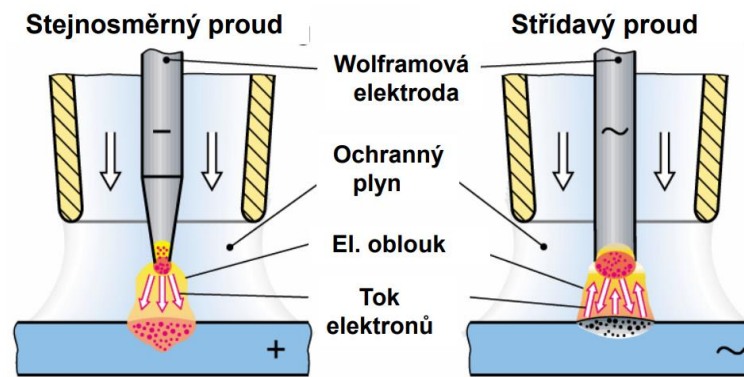
## 2.1.2 Druhy svařovacích proudů

### Svařování stejnosměrným proudem

Nezákladnější způsob svařování metodou TIG. Elektroda je napojená na záporný pól a svařovaný materiál na kladné. Toto zapojení nazýváme tzv., „přímé zapojení“. Množství vneseného tepla se rozdělí na ze 2/3 do základního materiálu a z 1/3 do elektrody. Vzhledem k tomu není elektroda tak tepelně zatěžovaná a ve svařovaném materiálu můžeme dosáhnout velké hloubky závaru. Tento způsob se používá pro svařování všech ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Je možné takto svařovat i slitiny hliníku za použití směsi Helia a Argonu. Právě díky Helium se vlivem stejnosměrného proudu přivádí větší množství tepla, roztavujeme tedy i oxidy na povrchu materiálu, které se následně usazují na okrajích taveniny a střed svaru je poté čistý. Nepřímé zapojení (tj. elektroda připojená na kladný a základní materiál na záporný pól) se v praxi využívá zřídka z důvodu tepelného zatížení elektrody. Schéma zapojení je naznačeno na obr. 7. [7; 12]

### Svařování střídavým proudem

Na principu této charakteristiky se při zapojení kladné polarity na elektrodě hlavně využívá pro čistící účinek na svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Svařování hliníku je hlavně obtížné z důvodu oxidu hliníku, který vytváří povrchovou vrstvičku chránící materiál proti další oxidaci na povrchu. Čistícího účinku se dosáhne pomocí zapojení elektrody na kladný pól zdroje. Díky tomu se na svařovaném materiálu vytvoří katodová skvrna a její nestabilitou dochází k přesunu na místa pokrytá oxidy, jelikož mají nižší emisní energii. Emise elektronů způsobí po zasažení katodové vrstvy elektrickým obloukem odpaření oxidů. Za přítomnosti ochranného plynu Argonu, kde jeho ionty působí na oxidy, se společně s dynamickým účinkem proudu plynu oxidy stáhnou na okraj svarové lázně. Svar nemá tedy tak velkou hloubku, čehož se dá ale docílit opačným zapojení elektrody. [7; 12]



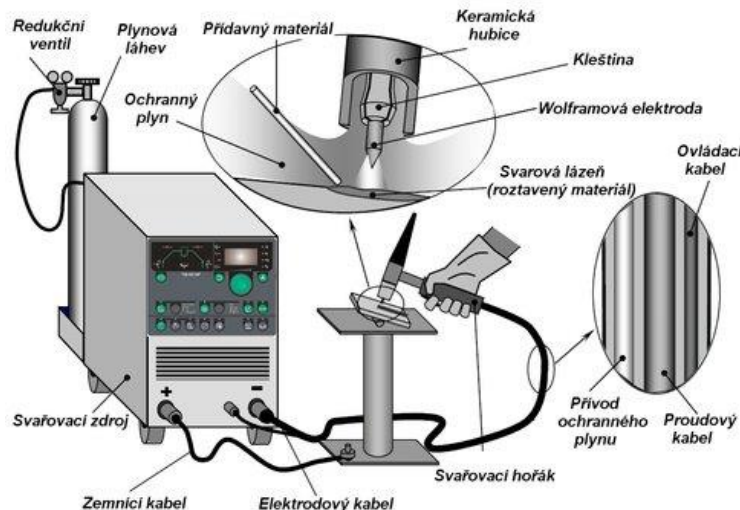
Obr. 7 Schéma principu druhu svařovacích proudů [12].

### Svařování impulsním proudem

Z dříve zmíněných je svařování impulsním proudem nejnovější metodou pro TIG svařování, je charakteristické změnou intenzity proudu v čase mezi dvěma proudovými hladinami. Jednotlivé hladiny jsou určovány základním proudem a impulsním proudem. Pomocí vhodně zvoleného pulzu dosahujeme přesné regulace svařovacího režimu a tím je i možné dávkovat vnesené teplo do svarové lázně a tvarovat ji. Dosahuje se lepší celistvosti a mechanických vlastností svarů. Svarová housenka je dobře formovatelná a má i hezký vzhled. Neposlední výhodou je snížení náchylnosti svarů na mezikrystalickou korozi u vysokolegovaných ocelí. Tato metoda ale vyžaduje velkou zručnost svářeče. [7; 12]

#### 2.1.3 Svařovací zařízení

Sestava se rozděluje dle principu svařování stejnosměrným a střídavým proudem. Pro svařování stejnosměrným proudem se používá zdroj stejnosměrného proudu, řídicí jednotka svařovacího obvodu, zapalovací jednotky, programátoru, svařovacího hořáku, chladicí jednotky, redukčního ventilu a zásobníku plynu. Zdroj stejnosměrného proudu je usměrňovač s transformátorem se strmou charakteristikou, dnes se ale více využívá kompaktnějších inventurů. Řídicí jednotka dle názvu je řídicím systémem, který ovládá celý proces svařování (tj. začátek a konec svařování, náběh a sestup proudu nebo řízení různých úrovní proudu). Zapalovací jednotka zařizuje jiskrové bezzkratové zapálení oblouku s vysokofrekvenčním vysokonapěťovým ionizátorem, nebo zkratem při nízkém zapalovacím proudu. Programátor společně s řídicí jednotkou řídí proces svařování, řídí dofuk a předfuk ochranného plynu, reguluje činnost ionizátoru a činnost chladicího okruhu. Samotný chladicí okruh udržuje na správné teplotě chladicí jednotka, při nižších proudech je opatřena ventilátorem a systémem na dopravu chladicího media do hořáku. Poslední částí je zásobník ochranného plynu a redukční ventil, kteří společně zabezpečují stálý tlak s přednastaveným průtokem při procesu. Schéma svařovacího zařízení je zobrazeno na obr. 8. [7; 12; 15]



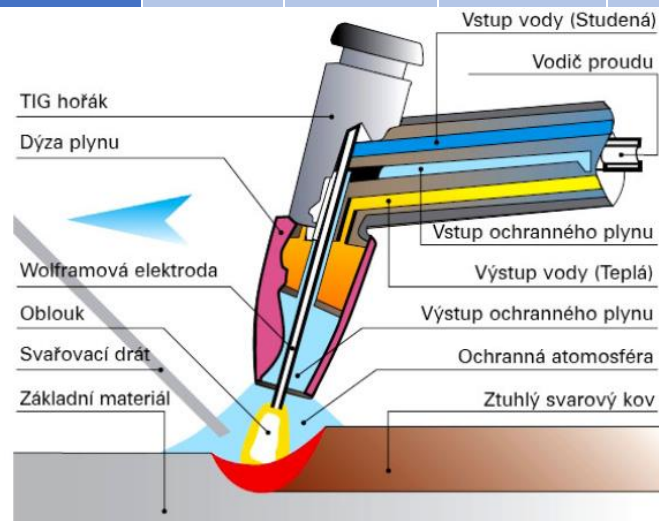
Obr. 8 Schéma svařovacího zařízení TIG [45].

### Svařovací hořák

Jde o nejvíce namáhané zařízení z celé soustavy svařovacího zařízení, které zajišťuje přívod elektrického proudu k wolframové elektrodě, ochranného plynu a jeho fokusování a fixaci samotné elektrody. Vzhledem k teplotám vznikajícím při svařování jsou hořáky do 150 – 200 A chlazeny vzduchem, při vyšších proudech svařování, tj. 350 – 500 A, je zajištěno chlazení vodou, které se nejčastěji provádí strojně. Svařovací hořák, který je zobrazen na obr. 9 má vyměnitelnou kleštinu, díky které je možné pevně uchopit elektrodu, dle této fixace je docíleno snížení přechodového odporu mezi elektrodou a kleštinou. Kleština je vtačována do těla hořáku pomocí šroubované matice a zbytek elektrody je opatřen krytem. Další tepelně namáhanou součástí je keramická plynová tryska, která usměrňuje ochranný plyn, kovové trysky se používají převážně pro strojně vedené hořáky, které jsou chlazeny vodou. Samotné plynové trysky se volí na základě velikosti plochy, kterou chceme ochránit a dle proudového rozsahu. Rozměry trysky v závislosti na proudu jsou naznačeny v tab. 1.[7; 12, 15]

Tab. 1 Rozsah svařovacích proudů dle použitého průměru plynové trysky [7].

Proudový rozsah (A)	Do 70	70-150	150-250	250-300	300-500
Průměr plynové trysky (mm)	6-9	9-11	11-13	13-15	15-18



Obr. 9 Schéma svařovacího hořáku TIG [15].

**Wolframové elektrody [7, 12]**

Při svařování vznikají díky elektrickému oblouku velké teploty, kterým je potřeba odolávat, a právě proto jsou elektrody vyráběny ze spékaného wolframu který dosahuje teploty tavení až při 3380 °C. Čistota wolframu při výrobě dosahuje 99,9 % W, nebo nižší s přísadou legujících oxidů kovů (Thoria Th, Lanthanu La, Ceru Ce, Zirkonu Zr nebo Ytria Y), které jsou v celém objemu elektrody rozptýleny. Při výběru elektrody je potřeba dbát na správný typ dle legujících prvků, jelikož tak se docílí větší životnosti, ale může dojít ke snížení teploty tavení o 1000 °C, které je detailněji vyobrazeno v tab. 2, dále se přidáním oxidů zlepši zapalování elektrických oblouků a stabilita oblouku při svařování, a to pomocí zvýšené emise elektronů. Dle toho lze dosáhnout zmenšení výstupní práce elektronů, která je popsána u vybraných prvků v tab. 2 avšak s nižší výstupní prací nejsou prvky ideální z hlediska mechanických vlastností jako katodový materiál, z tohoto důvodu jsou oxidy přidávány jako příměs. Samotná klasifikace wolframových elektrod je definována normou ČSN EN ISO 6848, která je založena dle chemického složení samotných elektrod. Každá elektroda je pro jednoduché rozeznání označena barevným páskem, který odpovídá samotnému typu elektrody, od druhého konce je poté elektroda broušena do požadovaného tvaru. Elektrody jsou poté detailně značeny dvěma písmeny, které je vidět v tab. 3, kde první označuje přítomnost základního prvku W a druhé přímo odpovídá hlavnímu legujícímu prvku. Dodatková číslice doplňuje informaci ohledně hmotnostního procenta přísady oxidů. [7]

Tab. 2 Vliv legujících prvků na wolframovou elektrodu [7].

Název kovu	oxidu	Oxidační číslo	Teplota tavení oxidů kovu [°C]	Výstupní práce elektronů [eV]
<b>Wolfram</b>		W	3380	4,24 – 5,01
<b>Oxid thoričitý</b>		ThO <sub>2</sub>	3300	2,0 – 3,0
<b>Oxid lanthanitý</b>		La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2300	1,7 – 4,2
<b>Oxid zirkoničitý</b>		ZrO <sub>2</sub>	2700	
<b>Oxid ceričitý</b>		CeO <sub>2</sub>	2600	1,8 – 2,6
<b>Oxid ytritý</b>		Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2700	1,9 – 3,9

Tab. 3 Rozdělení označení wolframových elektrod [7].

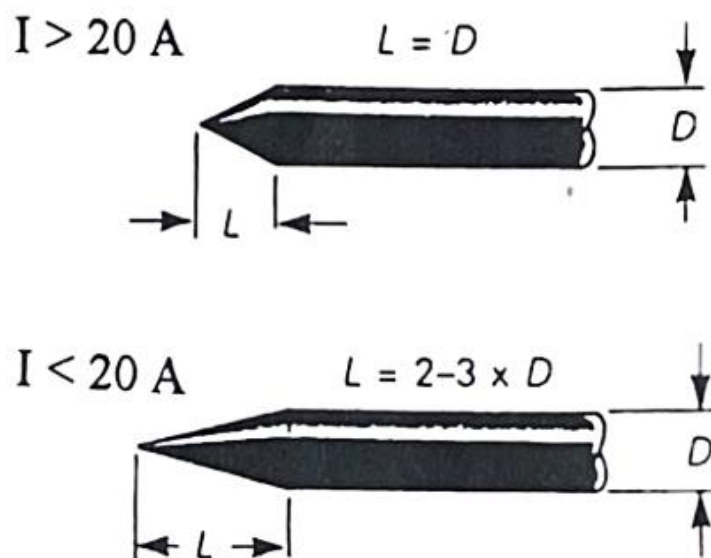
Označení	Hmotností procento oxidů	Barevné označení	Použití pro svařování
<b>WP</b>	W	Zelená	Hliník
<b>WT 10</b>	ThO <sub>2</sub> 0,9 – 1,2	Žlutá	Korozivzdorná ocel
<b>WT 20</b>	ThO <sub>2</sub> 1,8 – 2,2	Červená	Korozivzdorná ocel
<b>WZ 8</b>	ZrO <sub>2</sub> 0,7 – 0,9	Bílá	Univerzální
<b>WL 10</b>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,9 – 1,2	Červená	Univerzální
<b>WC 20</b>	CeO <sub>2</sub> 1,8 – 2,2	Šedá	Univerzální

Wolframové elektrody se dodávají v několika možných průměrech (a délkách), průměr elektrody a její způsob broušení přímo závisí na druhu svařovacího proudu, na polaritě na elektrodě při stejnosměrném proudu, na velikosti svařovacího proudu dle tloušťky základního

materiálu, jeho druhu a na typu svarového spoje, hloubce nebo tvaru svarového úkosu. Broušení elektrod musí vždy probíhat po směru podélné osy elektrody. Při použití jemného kotouče se dosahuje i vyšší životnosti elektrody, pokud by byla elektroda nabroušena podélně, může dojít ke ztrátě stability oblouku a vylamování jednotlivých částíček wolframu, které se mohou dostat do svarové lázně. Nabroušení elektrody tedy přímo ovlivňuje kvalitu svaru, pro samotné nabroušení jsou doporučeny hodnoty vrcholového úhlu, které se odlišují dle velikosti svařovacího proudu, nebo dle typu vedení svařovacího hořáku (ruční vs. strojní svařování), závislost svařovacího proudu na úhlu elektrody je naznačen v tab. 4 a v obr. 10. je schéma metod nabroušení wolframových elektrod.

Tab. 4 Doporučené hodnoty vrcholového úhlu pro stejnosměrný proud [7].

Svařovací proud	Vrcholový úhel
Do 20 A	30°
20 – 100 A	60° - 90°
100 – 200 A	90° - 120°
Nad 200 A	120°



Obr. 10 Schéma možných způsobů broušení elektrod [7].

## 2.2 Svařování laserem

Označení LASER je složené z počátečních písmen anglického názvu, který popisuje samotnou činnost a tedy „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ v českém doslovném překladu zesílení světla stimulovanou emisí záření. Tu poprvé popsal v roce 1916 Albert Einstein společně se spontánní emisí, které představují základy kvantové mechaniky. Společně s Einsteinem se kvantové mechanice věnovali i M. Planck a N. Bohr, kteří spolu specifikovali základní zákony kvantové elektroniky. Bohrova teorie pojednává o elektronovém obalu, kde při absorpci přechází elektron na vyšší kvantovou dráhu kde dosáhne energie větší o energii fotonu pohlceného, tento jev nazýváme excitovaný stav. Při samovolném přechodu zpět, tedy na základní dráhu se tato energie vyzáří opět v podobě fotonu, nebo-li proběhne spontánní emise záření. Tato vyzářená energie ale nemá využití pro zesílení z hlediska různých vlnových délek fotonů a ztrácí se v podobě tepla, fotony mají náhodný směr, fázi i polarizaci.

A. Einstein ve své práci popsal stimulovanou emisi záření, která má princip zobrazený na obr. 11, jako ozáření vlnou s určitou frekvencí kmitání pomocí externího dodání energie (elektromagnetického záření, kterému se říká v procesu „čerpání“), vybudí excitované fotony a ty poté přecházejí z vyšší energetické hladiny na nižší a při přechodu atomy emitují nové fotony se stejnou velikostí energie jako měl atom iniciační. [3; 7; 12; 18]

Laserový paprsek se dá popsat jako všeobecné vlnění, které patří do skupiny elektromagnetického záření. Hlavní rozdíl oproti jiným druhům je ve vlnové délce, jelikož světlo, které je lidským okem pozorovatelné, má různé vlnové délky a frekvence, jež se spontánně šíří různými směry. Hlavní ideou laseru je, že určitá frekvence elektromagnetické vlny (které násobek Planckovy konstanty určuje vzdálenost dvou energetických hladin) nutí přecházet elektrony z vyšší na nižší energetickou hladinu, díky čemu se docílí posílení původní vlny. Všeobecně lze nazvat lasery jako transformátory energie nižší kvality na vyšší (z tepelné, elektrické, světelné na energii laseru), tedy z pohledu termodynamiky snižuje entropii soustavy za určité spotřeby dodané energie. Z hlediska kvantové fyziky může každý atom přijmout nebo vydat energii v daných dávkách neboli kvantech, které jsou určovány rozdílem vzdáleností mezi energetickými hladinami, které může elektron zaujmout. Tento jev nám popisuje Bohrovův vztah. [1; 3; 7; 12; 18]

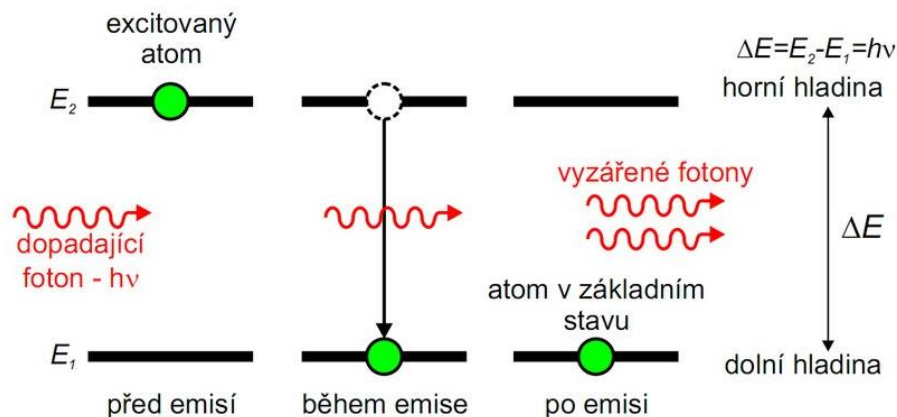
Př. 1: Bohrovův podmínka záření atomu zní: [7]

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

Kde: E- energetický rozdíl mezi hladinami

h- Planckova konstanta ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s)

$\nu$ - frekvence vyzářeného atomu odpovídající přechodu mezi energ. hladinami



Obr. 11 Schéma rezonátoru pevnolátkového laseru [19].

### 2.2.1 Vlastnosti laserového paprsku

Mezi přednosti laserového paprsku bezpochyby patří jeho vlnová délka, kde každý jeden stimulovaný foton má stejnou vlnovou délku, energii a směr. Specifickými vlastnostmi laserového paprsku je také monochromaticnost, koherentnost, směrovost, vysoká intenzita a malá rozbíhavost. [1]

Zmíněné vlastnosti a součásti laseru jsou charakterizovány: [1]

- Koherentnost – souvislost, uspořádanost – vyjadřuje že světelné vlnění má stejné frekvence a fázový rozdíl je v bodě prostoru konstantní.
- Směrovost – laserový paprsek vzhledem k optice a proudu fotonů lze usměrnit do jednoho velmi malého bodu nebo rozprostřít na plochu dle potřeby.

- Monochromaticnost – dle stejné vlnové délky každého fotonu je zaručená jednobarevnost.
- Aktivní prostředí – je skupenství různého druhu s rozdílnými vlastnostmi a složením, kde dochází k excitaci atomů a tvorbě stimulované emise.
- Optický rezonátor – soustava zrcadel která zesiluje světlo, tedy excitované atomy. Zrcadla jsou kolmo na osu laserového paprsku, kde jedno je polopropustné a druhé nepropustné. Excitované atomy mezi zrcadly emitují. Vytváří tzv. emisní řetězec, při odrazech zrychlují a po několika odrazech skrze polopropustné zrcadlo vyletí v podobě koherentního záření. Největší ztráty na výkonu laseru se odehrávají právě v rezonátoru, proto je kladen velký důraz na kvalitní zpracování odrazivých zrcadel jako je např. Fabryův-Perotův rezonátor.
- Čerpací zařízení – nepostradatelný systém pro generaci energie pro aktivní prostředí.
- Chlazení – vzhledem k výkonu laserového paprsku vznikají vysoké teploty, které je potřeba chladit pomocí vodního okruhu, ten se stará o udržení pracovní teploty na rezonátoru optiky a aktivní prostředí za pomoci demineralizované vody. Nejčastěji bývá u svařovacích zdrojů pracovní teplota kapaliny okolo 30°C, dokud se okruh na tuto teplotu neohřeje nelze zahájit svařování.
- Vedení svazku – soustava optického kabelu s ovládacími prvky zakončené výstupní optikou na fokusaci laserového paprsku. Laserový paprsek je veden a zlepšován na kvalitě, je možné upravit jeho výstupní průměr. Vznikají zde jisté energetické ztráty.
- Řídicí počítač – pomocí počítače je možné koordinovat veškeré nastavení zdroje a výstupní kvality laserového paprsku pomocí parametrů na ovládacím panelu pro zajištění optimálního chodu. Díky počítačem řízenému procesu lze úkony s laserem jednoduše automatizovat.

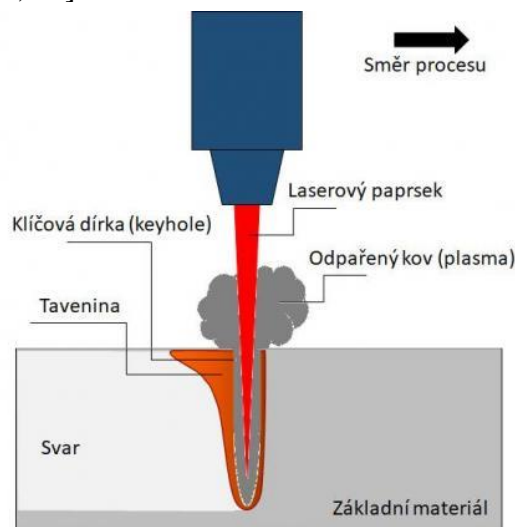
### 2.2.2 Princip laserového svařování

Svařování pomocí laserového paprsku se již dlouhodobě dostává do povědomí průmyslové výroby a díky jeho kladným vlastnostem je aplikováno v oblastech, kde je potřeba dosáhnout kvalitního provařeného svaru s dostatečnou hloubkou, malou teplotně ovlivněnou oblastí a téměř bez nutnosti dalšího opracování. Proces je možné zautomatizovat i jednoduše korigovat pomocí rychlé změny svařovacích parametrů. Dosahuje se i velmi vysokých rychlostí svařování za konstantních dodávek koncentrovaného tepla do jednoho bodu nebo plochy. Při svařování se energie laserového paprsku rozprostřeného do plochy pohybuje v řádu  $10^4$ - $10^9$  W.cm<sup>-2</sup> během penetračního režimu svařování. Plošná hustota energie vnesená do materiálu se mění dle použité technologie viz. tab. 5, kde je znázorněno porovnání svařovacích technologií. [1; 3; 7; 9]

Tab. 5 Svařovací technologie a jejich vlastnosti [10].

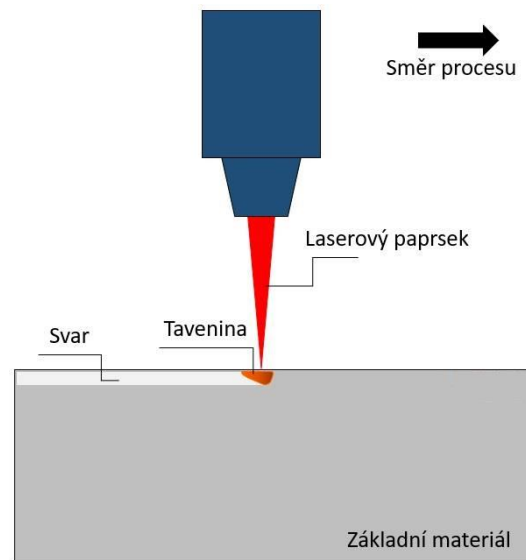
Metoda svařování	Plošná hustota energie [W/cm <sup>2</sup> ]	Svařovací rychlost [m/min]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru [mm]
Plamen	10 <sup>3</sup>	0,01	3	3
Elektrický oblouk	10 <sup>4</sup>	0,5 - 3	4	2
Plasma	10 <sup>6</sup>	0,5 - 5	až 12	1
Laser	10 <sup>9</sup>	10	25	0,1 – 0,5
Elektronový paprsek	10 <sup>8</sup>	0,5 - 5	200	0,03

Svařovací proces laserovým paprskem probíhá dvěma základními způsoby. Nejčastěji používaná je metoda svařování pomocí laserového paprsku, která díky svému charakteristickému tvaru při svařování dostala název „Key hole“ jelikož při pohledu shora svarová lázeň doslova připomíná tvarem klíčovou díрку. Ta vzniká pomocí usměrněné energie a intenzity paprsku do velmi malého místa na rozhraní dvou svařovaných materiálů. Pomocí vysoké intenzity energie a par kovů vzniká plazma, která ještě pomáhá k hlubokému provaření a neovlivňuje změny na šířce svaru. Paprsek tvoří hluboký a úzký kráter (tzv. kapiláru) ionizovanými parami odpařeného kovu o vysoké teplotě. Stěny kapiláry jsou zaplněné roztaveným kovem a ionizovaný plyn (který vznikne při dostatečné dodávce energie, dochází k ionizaci ochranného plynu a vzniku plazmatu ochranného plynu, který ovlivňuje výkon a kvalitu svaru) kov drží na svém místě a s postupem laserového paprsku plyn expanduje a tekutý kov slitím vytvoří svarový spoj. Vznikají velmi kvalitní hluboké a úzké svary, jako je vidět na obr. 12. [1; 3; 7; 20; 23]



Obr. 12 Penetrační režim svařování laserem „Key hole“ [21].

Druhá metoda svařování pomocí laserového paprsku probíhá pomocí počítačem řízené dodávky koncentrované energie (do  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) do místa svarové lázně v přednastavených intervalech (nízká opakovací frekvence), která se střídá s prodlevou kdy má svarová lázeň čas na ztuhnutí. Při takto se opakujícím procesu vzniká svarová housenka, kterou tvoří několik vzájemně se překrývajících bodů, jako je vidět na obr. 13. Svar dosahuje hloubky pouze několik desetin milimetrů, dochází k většímu tepelnému ovlivnění a vzhledem k povaze procesu se takto svařují těžce svařitelné materiály nebo velmi tenké materiály, kde by pomocí penetračního režimu hrozilo propálení (např. fólie). Při svařování laserem je velkou výhodou oproti konvenčním technologiím (např. MIG/MAG/TIG) možnost přímé změny nastavení parametrů paprsku, množství průtoku plynu nebo rychlosti podávání přídavného drátu skrze ovládací panel. Pomocí toho lze jednoduše nakonfigurovat a přednastavit svařovací režimy, které jsou uloženy v paměti stroje a urychlují reakce na změny výroby. Při samotném ručním svařování je laserové vedení paprsku schováno v pistolovém gripu, který je opatřen řídicími ovládacími prvky, chlazením, optikou a případně podavačem přídavného drátu. S tímto zařízením lze snadno svařovat v různých polohách a díky manipulovatelnosti lze svařovat i na hůře dostupných místech. Konec pistole je opatřen měděnou tryskou, která disponuje různými tvary pro snadnější tvorbu svarových spojů v různých pozicích. Svařitelnost materiálů je téměř stejná jako u technologie TIG. Největší rozdíl je v rychlosti ochlazování díky malému množství vneseného tepla. Všeobecně pro svařování laserem nesmí překročit obsah uhlíku v materiálu hodnotu 0,2 %. [1; 3; 7; 20; 23]



Obr. 13 Kondukční režim svařování laserem [21].

### Ochranné plyny

Ochranné plyny se u laserového svařování používají naprosto stejné jako u svařování technologií TIG, tedy Argon, Helium nebo Dusík. Tyto plyny pozitivně ovlivňují svařovací proces a zvyšují stupeň absorpce plazmatu vytvářeného laserem. Pochopitelně zde ochranné plyny eliminují kontakt svarové lázně s okolní atmosférou, a tím zlepšují výslednou kvalitu svaru. Existují ale i případy kdy není nutno použít ochranné plyny. Avšak, při určité dodávce energie paprsku lze ionizovat ochranný plyn a vytvořit plazma ochranného plynu, které negativně ovlivňuje svařovací proces a pohlcuje určitou část výkonu laseru. Energie spotřebovaná plazmatem se nedostane do svařovaného materiálu a má vliv na tvorbu klíčové dírky. Výsledný svar je poté široký a málo provařený do hloubky. Tomuto jevu se dá předcházet správnou volbou ochranného plynu, tedy Helia. Tento plyn umožňuje tvorbu nejhlubších průvarů za dodržení velké rychlosti svařování. Je velmi účinný ale velkou nevýhodou je jeho vysoká spotřeba při samotném procesu (nízká hustota) Použití helia je tedy ekonomicky velmi náročné, jelikož se většina plynu ztratí rychlou expanzí do okolí. Kompromisem pro toto řešení je volba vhodného mixu plynů (např. He/N<sub>2</sub>, He/Ar) pro snížení ceny a zachování vlastností Helia. [1; 4; 20; 33]

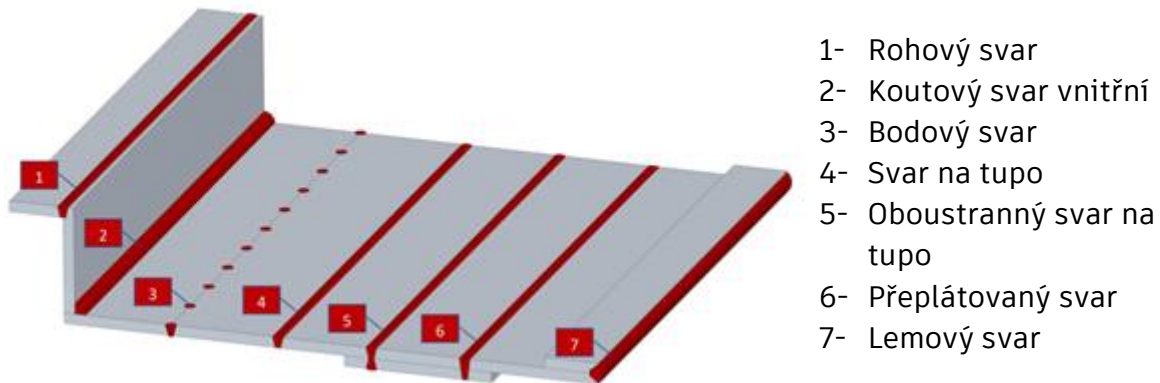
### Svarové spoje

Při svařování pomocí laserového paprsku je možné vytvářet základní typy svářecích spojů, které se vytvářejí konvenčními metodami, jsou to například koutové svary, svary na tupo nebo bodové svary. Detailnější typy svarů jsou vyobrazeny na obr. 14, speciálním charakteristickým typem svaru pro laserové svařování je průvarový svar, který tuto metodu vyzdvihává před ostatními (tento typ svaru dokáže svařit i elektronový paprsek). Pomocí tohoto svaru je možné spojit dva plechy položené na sobě. Zároveň je možné druhý plech neprovařit v plné tloušťce a díky tomu je druhá strana bez teplotně ovlivněné oblasti a bez známky pohledového poškození, dokonce svařované materiály nemusí být stejné tloušťky. [12; 22]

### Charakteristika svarových ploch

Svarové plochy jsou připravovány standardními postupy, jako je například třískové obrábění, stříhání nebo dělení pomocí laserového paprsku. U svařování svarů typu na tupo, nebo koutového typu je důležitým aspektem pro docílení nejkvalitnějšího sváru co nejlepší rovinnost kontaktních svarových ploch. Optimální mezera mezi svařovanými díly je 0,05 – 0,2 mm, ale všeobecně je požadován co nejtěsnější dotyk ploch, kterého se dá docílit upnutím do svěráků nebo uchopovacích přípravků s vyšší přesností uložení, které ale musí splňovat i další funkce.

V mnoha případech je nutné zabezpečit případný pohyb materiálu vlivem tepelné deformace, snadné a pevné upnutí polotovarů, správné napolohování vůči svářecí poloze. Velkou výhodou těchto svarů je dosažení hlubokých průvarů, malé teplotně ovlivněné oblasti, svařování i bez přídavného drátu a štíhlost svaru. Samotná příprava svarových ploch před svařováním ovlivňuje výslednou kvalitu svarového spoje, vzhledem k možnosti svařovat i bez přídavného materiálu je nutné dbát na čistotu svarových ploch. Tyto plochy je nutné očistit od zbytků okují nebo špon, které vznikly při obrábění a přípravě dílů pro svařování. Zároveň je nezbytné jednotlivé díly odmastit od tuků. Vlivem velké energie paprsku, který je vnášen do svarové lázně jsou tyto nečistoty společně s tuky odpařeny ve formě výparu, ten pak může být iniciátorem vady svaru (například vzniku póru). [12; 20]

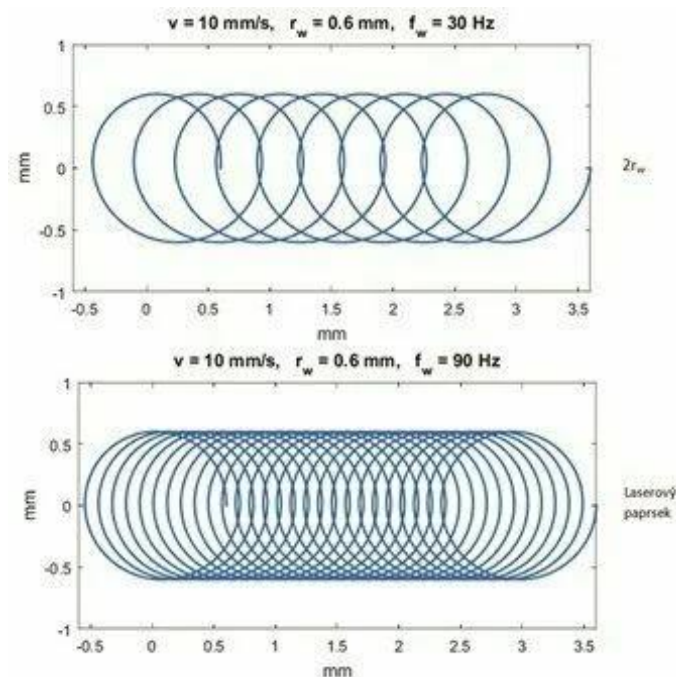


Obr. 14 Druhy svarových spojů [22].

### Modifikace svařovacího procesu laserovým paprskem

S postupnými aplikacemi laserového svařování přichází i vylepšování jeho vlastností a implementování nových metod svařování, kterými se proces zdokonaluje. S možnostmi laserového paprsku svařovat oproti konvenčním metodám o mnoho rychleji vzniká problém s pohybem samotné svařovací hlavy, která je často vedena pomocí robotického ramene nebo je vedena na pojezdech, které nejsou dostatečně schopny provést rychlé a prudké změny pohybu v rámci vteřin. Aby bylo možné tuto nevýhodu obejít byly implementovány nové systémy optických zrcadel, které jsou schopny vychylovat laserový paprsek v ploše, a to bez pohybu laserové hlavy. Samotná zrcadla jsou řízena počítačem, který laserový paprsek skrz přesné řízení pohybu optických zrcadel vychyluje ve velké rychlosti v různých geometrických tvarech (například kružnice nebo čtverec o rozměrech několika stovek mm). Pomocí této metody lze rapidně navýšit svařovací dynamiku procesu, eliminujeme pohyb svařovací hlavy, která svojí vahou pracuje ještě se setrvačností a vlivem takových rychlých změn pohybu hrozí nepřesné vedení paprsku. Hlavním přínosem této metody je zrychlení procesu svařování se zlepšením vlastností samotného svarového spoje i po stránce mikrostruktury, avšak přidáním speciální optiky zařízení nabralo na rozměrech a není vhodné do stísněných prostor, zároveň jsou polohovací zrcadla chlazena pouze vzduchem, kvůli čemuž je omezen svařovací výkon. Tato metoda v kombinaci s robotickým ramenem je nazývána „On the fly“ které se nejčastěji využívá pro svařování v automobilovém průmyslu pro bodové svařování. Další metodou vylepšení svařovacího procesu je rozmítání laserového paprsku - tzv. Wobbling. Samotná metoda je podobná předešlému typu s rozdílem přidání oscilačního pohybu paprsku, tedy při tomto procesu dochází k mikropohybu paprsku pomocí speciální optiky a vychylování zrcadel po křivce, která je přednastavená v řídicím počítači (kružnice, čtverec, trojúhelník, osmička nebo přímka). Tyto pohyby jsou plně nastavitelné od frekvence přes rozměr samotného obrazce, který paprsek opisuje. Díky tomu lze při hlavním svařovacím pohybu a využití kruhové oscilace při různých frekvencích dosáhnout poměrně husté nebo řídké spirály, jako je vidět na obr. 15. Při vyšších frekvencích se dosahuje poměrně husté spirály, která připomíná bodový paprsek,

jenž má mnohem větší průměr než samotný laserový paprsek. Pohybem paprsku také dochází k pohybu a míchání svarové lázně, díky čemu je možné ovlivňovat vlastnosti samotného svaru i mikrostruktury. Pro ideální nastavení je potřeba zkušeností a znalostí procesu, jelikož je mnoho vstupních parametrů, kterými lze ovlivnit průběh tvorby svaru. Dílčími parametry je tvar rozmítací křivky, frekvence rozmítání a amplituda rozmítání. Na základě rozmítání lze překonat i případné mezery mezi základními materiály, které se mají svařit a není takový požadavek na ustavení materiálů do přesných přípravků. Zařízení pro tvorbu rozmítání je oproti skenovací hlavě o mnoho kompaktnější a odpovídá rozměry standardní svařovací jednotce, která je přímo napojena na laserový svazek. Zrcadlová optika má taktéž menší rozměry a obsahuje pouze čočku, která vykonává usměrnění paprsku skrze rotace a malé úhly naklápění. [23; 24; 25; 26; 44]



Obr. 15 Schéma križnice při Wobbling metodě svařování [44].

### Svařitelnost laserovým paprskem

Laserový paprsek díky svým vlastnostem poskytuje širokou škálu svařitelných materiálů jak v tlustých tloušťkách, tak se využívá i pro mikrosvařování nebo dokonce k povrchovému legování. Při svařování nevznikají vysoká napětí ani deformace a rychlost ochlazování je velmi vysoká, a proto nesmí obsah uhlíku u legovaných a nelegovaných ocelí přesáhnout 0,2 %. Zvláště velmi dobrých výsledků kvality svarů dosahuje laserový paprsek při svařování titanu, molybdenu a vysokolegovaných ocelí, samostatně svařitelnosti jednotlivých materiálů jsou vyobrazeny v tab. 6. Při velkých dodávkách energie, které laserový paprsek při svařování poskytuje je možné dosáhnout rychlého ohřevu a tím svařit i materiály s vysokou teplotní vodivostí (typickými zástupci jsou Cu, Al, Ag) anebo materiály s vysokou teplotou tavení (patří sem W, Mo, Ti, Tl, Zr). [7; 20]

Tab. 6 Svařitelnost materiálů laserem [7].

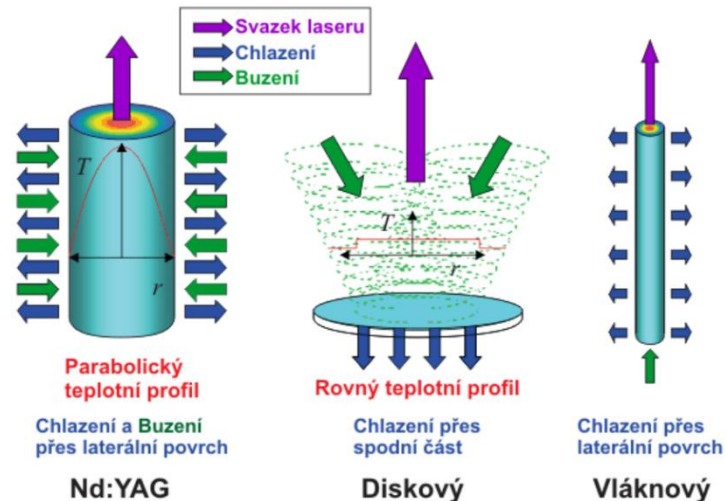
	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	■													
Ag	□	□												
Au	□	■	■											
Cu	□	□	■	■										
Pd		■	■	■										
Ni	□		■	■	■	■								
Pt		□	■	■	■	■	■							
Fe			□	□	▲	▲	▲	■						
Be			□	□	□	□		□						
Ti	□	□	□	□	□	□	□	□		■				
Cr					▲	▲	■	■		▲				
Mo						□	■			■	■			
Te					▲	▲	□	□		■		■		
W					□	□		□		□	■	■	■	■

Legenda: ■ velmi dobrá, ▲ dobrá, □ dostatečná

### 2.2.3 Rozdělení typu laserů

#### Pevnolátkové lasery

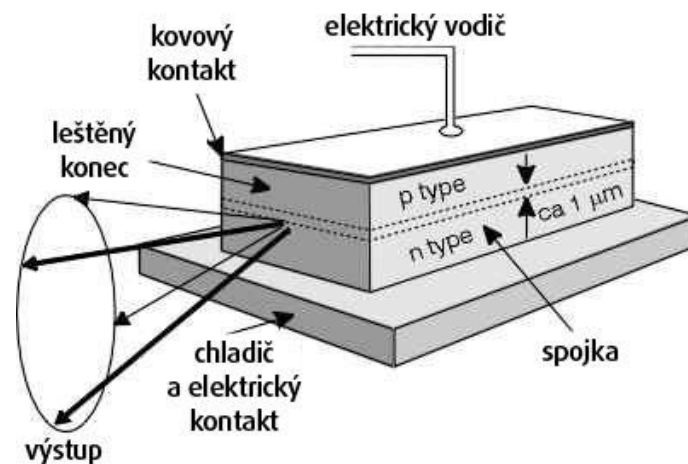
Nejnámější a historicky nejpoužívanější zástupce je Nd:YAG laser, který pracuje v infračervených vlnových délkách a dokonce i ve viditelném spektru světla. Tyto typy laseru se používají v kombinaci buzení pomocí výbojek (označení LPSS – lamp pumped solid state) nebo laserových diod (označení DPSS – diode pumped solid state). Aktivní prostředí je tvořeno maticí z YAG krystalu s aktivační látkou dopovaného neodymu  $\text{Nd}^{3+}$ . Zdroj je málo náročný na údržbu a může pracovat v různých režimech za stabilních podmínek. Je velmi vhodnou volbou pro svařování, ale disponuje nízkou účinností a vysokými nároky na chlazení. Dalšími zástupci pevnolátkových laserů jsou diskové a vláknové lasery, které se liší tvarem aktivního prostředí, kde u Nd:YAG laseru je ve tvaru tyčinky jako je vidět na obr. 16 u diskového je tvar tenkého disku a vláknového laseru je prostředí tvořeno optickým vláknem. Největší výhodou těchto laserů je velikost vlnové délky 1  $\mu\text{m}$ , kterou lze jednoduše vést optickým vláknem a ulehčuje jeho aplikaci, díky snazšího vedení paprsku. Dalším představitelem pevnolátkového laseru je rubínový laser, kde aktivní látka je tvořena monokrystalem rubínu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tento laser byl vůbec prvním fungujícím laserem na světě, který vyzářoval paprsek červeného světla. [3; 7; 27; 28; 29; 30]



Obr. 16 Druhy pevnolátkového laseru [28].

### Diodové lasery

Dnes již hojně používaný zdroj laserového paprsku díky velikosti používaných diod a poměrně vysoké účinnosti, nevýhodou je velká rozbíhavost. Záření vzniká za podmínky dosažené inverze populace na P - N přechodu diod, kde při požadované intenzitě elektromagnetického pole dochází k stimulované emisi záření. Vlnová délka diodového laseru je určena energetickou mezerou mezi přechody. Výkon polovodičových laserů se pohybuje okolo několika mW až několika kW. Tyto hodnoty jsou dosaženy skládáním diod do tyčí, kterých může být několik pro jedno zařízení a je možné díky tomu nastavit hodnotu výkonu zařízení dle potřeby. Běžně se výkony pohybují v řádech W až desítek kW. Další výhodou tohoto typu laseru je jeho účinnost, která dosahuje až 50 % ale kvalita výstupního laserového svazku, je nízká, a proto se tento typ laseru nejběžněji využívá v spotřební elektronice nebo pro svařování plastů a laserové navařování. Na obr. 17 je vyobrazeno schéma diodového laseru. [3; 7; 27; 28; 29; 30]

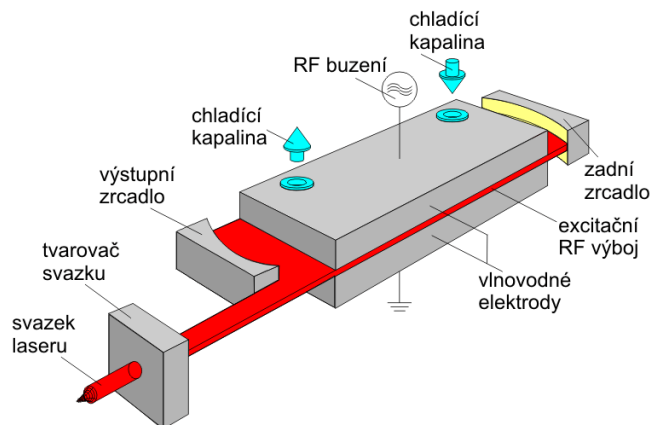


Obr. 17 Schéma diodového laseru [28].

### CO<sub>2</sub> lasery

CO<sub>2</sub> malovýkonné lasery s aktivním prostředím tvořeným plynem, který je homogenní a zajišťuje výborné parametry. Aktivní prostředí je často tvořeno směsí plynů He + N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>, které jsou uzavřeny ve skleněné trubici v poměru 82 : 13,5 : 4,5, dle zdroje [7]. Výkon plynového laserového paprsku se pohybuje od 50 W do desítek kW a účinnost je okolo 20 %, nevýhodou je nemožnost vedení paprsku skrze optické vlákno a je zapotřebí optických zrcadel. Využití plynových laserů se našlo v medicíně, a v průmyslu pro zpracování plechů. S vlnovou

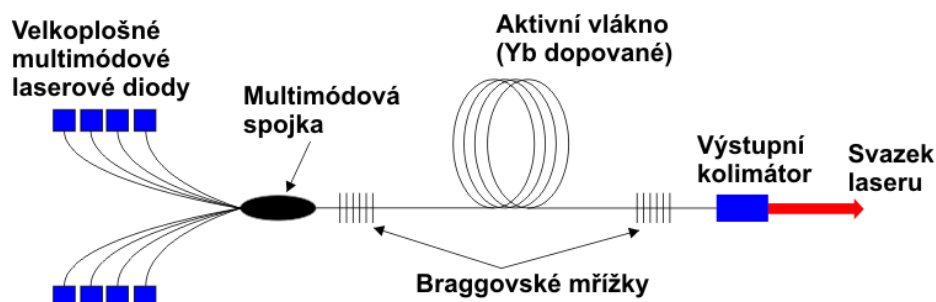
délkou 10,6  $\mu\text{m}$  je vhodnou volbou pro svařování a řezání oceli. Na obr. 18 je vyobrazeno schéma plynového slab laseru. Excimerové lasery jsou speciálním druhem plyných laserů, které se musí vzhledem k vlnové délce 157-351 nm používat společně ve vakuu, jelikož by atmosféra tyto vlnové délky jednoduše absorbovala. Tento paprsek ve vakuu disponuje vysokou kvalitou a nízkou divergencí. Onu vlnovou délku způsobuje kombinace plynů xenon a argon, kde díky buzení se molekuly plynu dostanou do excitovaného stavu (odtud samotný název). Nejčastější aplikace tohoto laseru jsou jemné opracování bez tepelného ovlivnění při mikroobrábění v mikroelektrice nebo medicíně. Nevýhodou je velmi nízká životnost prostředí. [3; 7; 27; 28; 29; 30]



Obr. 18 Schéma plynového CO<sub>2</sub> slab laseru [27].

### Vláknové lasery

Vysoce efektivní a výkonné lasery s poměrně malými rozměry. Díky konstrukci prakticky bezúdržbový (absence mechanických prvků a optických součástí) zdroj laserového paprsku, který drtivě převládá v průmyslové výrobě. Patří mezi nejmodernější zástupce pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím je zde dlouhé, tzv. aktivní optické vlákno, které je tvořeno a dopováno Yterbiem. Buzení je zde vedeno z laserových diod přes optickou spojku do vlákna, kde se nacházejí Braggovské mřížky (struktury vytvořené na optickém vlákne, které vede laserový paprsek), jež suplují zrcadla. Výstupním prvkem je optický kolimátor, ze kterého vystupuje již samotný svazek laseru. Pracovní režimy vláknových laserů se dělí poté na kontinuální (označení CW), pulsní nebo kvazipulsní (s označením QCW). Díky modularitě lze jednoduše navyšovat výkon a je zaručena i dlouhá životnost. Účinnost tohoto typu dosahuje až k 30-35 % a díky konstrukci zabírá velmi malý prostor, navíc ze všech druhů laserů má nejnižší provozní náklady a údržbu. Na obr. 19 je vyobrazeno schéma vláknového paprsku. [3; 7; 27; 28; 29; 30; 31]



Obr. 19 Schéma vláknového laseru [28].

## 2.3 Porovnání ručního laserového svařování a TIG

Pro přímé porovnání nejzákladnějších parametrů obou technologií byla vypracována tab. 7, kde je blíže popsáno jednotlivých vlastností z hlediska výhod a nevýhod.

Tab. 7 Porovnání vlastností svařování technologie TIG a laserového paprsku [32].

Vlastnost	Laserové svařování	TIG
Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	Malá TOO z hlediska malého vneseného tepla do malé plochy svařence.	Veliká TOO, oproti laseru větší vnesené teplo na plochu svařence skrze elektrický oblouk.
Tepelný příkon při svařování	Nízký tepelný příkon z důvodu malé TOO.	Vysoký tepelný příkon skrze velkou TOO.
Přesnost a kvalita svařování	Přesnost svařování závisí na zkušenosti svářeče, jelikož se paprsek zaostřuje do velmi malého bodu. Během svařování svářeč nevidí skrze světlo přesné zaměření paprsku. Po seznámením se strojem vznikají velmi přesné a kvalitní svary.	Dle zkušeností svářeče se dá dosáhnout velmi dobré přesnosti a kvality svarového spoje. TIG poskytuje dobrý dohled nad svařovacím procesem.
Tepelné deformace při svařování	Vzhledem k malému množství vneseného tepla se tepelné deformace téměř nevyskytují, pouze u tenkých plechů je riziko deformací při špatně nastavených svařovacích parametrech.	Kvůli velkému množství vneseného tepla a velké TOO vznikají při svařování tepelné deformace.
Investice do zařízení	Požizovací cena je oproti klasickému TIG zařízení velmi vysoká. Cena pohybuje okolo 0,5 - 1 mil. Kč v závislosti na výkonu zařízení a příslušenství.	V porovnání s laserovým zařízením je počáteční investice do TIG zařízení mnohem levnější.

## 2.4 Vady svarů

Defekty, resp. vady svarů jsou všeobecně odchylky od předem předepsaných vlastností svarů, které jsou stanoveny technologem a technickými normami. Je nutné vady považovat za nebezpečné koncentrátoři napětí, přímo ovlivňují mechanické vlastnosti svarového spoje a při překročení určitých mezí a splnění daných podmínek se mohou stát iniciátory křehkých lomů. Vady na svařencích se mohou vytvořit na povrchu svaru, kde jsou viditelné pouhým okem, nebo neviditelné tedy skryté. Tyto vady jsou poté objeveny až pomocí speciálních přístrojů v kontrolních laboratořích. Až podle měření a získání dat ohledně velikosti vady, typu a tvaru lze rozhodnout, zda se jedná o vadu přípustnou, nepřípustnou, opravitelnou nebo neopravitelnou. Samotná klasifikace vad je určena dle normy ČSN ISO 6520-1, kde jsou vady rozděleny do šesti skupin. Vady přípustné jsou takové vady, které se dovolují na základě normy nebo smluvního vzorku a jejich odstranění není nutné. Naopak nepřípustné vady normy nesplňují, a je nutné rozhodnout, zda je vada opravitelná nebo ne. Z hlediska bezpečnosti se do provozu a funkce svařence, mohou připustit pouze takové svary s vadou, která neovlivní výslednou funkci dílce a provozním zatížením neohrozí bezpečnost zařízení (například trhliny, zápaly a studené spoje), podle velikosti a typu vady na základě normy ČSN EN ISO 5817. [37; 49; 50]

Základní typy vad jsou: [35; 36; 37; 38; 39; 47]

- Trhliny za studena – velmi obvyklá vada při svařování feritických a martenzitických ocelí za přítomnosti vodíku ve svaru, vzniká kvůli nedostatečné ochraně plynem před okolní atmosférou nebo přítomností znečištění ve svarovém kovu. Na obr. 20 je vidět trhlina v horní části svarového spoje.



Obr. 20 Svarový spoj s trhlinou za studena [35].

- Trhliny za horka – vznikají především u austenitických ocelí (hlavně korozivzdorné chrom-niklové oceli), stojí za nimi přítomnost síry a fosforu, které tvoří sloučeniny s železem a vlivem nižšího bodu tavení vzniká porucha krystalové mřížky a vznik reziduálních napětí. Na obr. 21 je znázorněna trhlina za horka na svarovém spoji.



Obr. 21 Svarový spoj s trhlinou za horka [35].

- Neprovařený kořen – vlivem vysoké rychlosti svařování a nedostatečného natavení základního materiálu může docházet ke vzniku neprovařeného kořene, nebo přilehlých housenek v případě vrstveného svaru u větších tlouštěk materiálů. Tato vada přímo ovlivňuje negativně mechanické vlastnosti, ukázka vady je znázorněna na obr. 22.



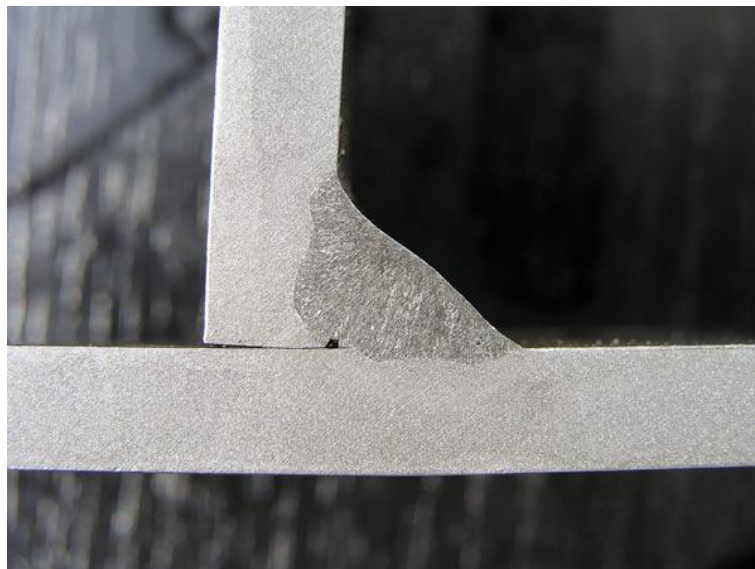
Obr. 22 Svarový spoj s neprovařeným kořenem [34].

- Póry a dutiny – tyto vady nejčastěji vznikají za přítomnosti nečistot a tuků, které vlivem odpaření ze svarového spoje zamezí přístupu paprsku a zapříčiní vznik vady. Častý výskyt je i u materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku nebo u ocelí s povlakem zinku. Mohou být viditelné na povrchu nebo i vnitřní, na obr. 23 je svarový vzorek se značnou mírou porezity na povrchu svaru.



Obr. 23 Svarový spoj s porezitou [36].

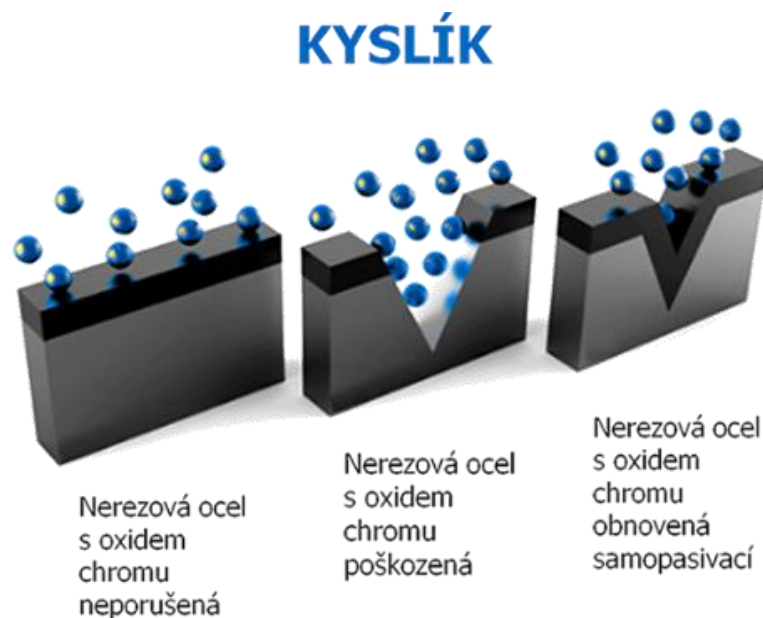
- Studený spoj – hlavním znakem je nedostatečné natavení základního materiálu a svarového kovu nebo svarové housenky. Tuto vadu nejčastěji způsobuje špatně zvolená technologie svařování (nízký svařovací proud), vysoká rychlost svařování, nebo špatné vedení elektrody, jako je vidět svarové spoji na obr. 24.



Obr. 24 Svarový spoj se studeným spojem [36].

## 2.5 Korozivzdorné oceli, vlastnosti a rozdělení

Celým názvem ušlechtilá korozivzdorná ocel, se svým chemickým složením vyznačuje oproti standartním konstrukčním ocelím větší odolností proti chemické a elektrochemické korozi. Tyto vysocelegované oceli jsou převážně slitiny železa s obsahem uhlíku  $\leq 1,2\%$  C (větších obsahů uhlíku dosahují pouze martenzitické korozivzdorné oceli, ostatní druhy obsahují méně jak  $0,1\%$  C) a obsahem chromu  $\geq 11,5\%$  Cr. Díky chromu je dosažena schopnost pasivace povrchu oceli (vrstva tenká o velikosti  $5 \cdot 10^{-6}$  mm), která chrání kov před samotnou korozi a disponuje i schopností obnovy, jako je vidět na obr. 25. Na povrchu oceli vzniká oxid chromitý, který ocel chrání. Vlivem prostředí, které může být agresivní se záměrně do oceli přidávají další legující prvky (Ni, Mn, Mo, N, Cu), aby ocel zůstala stále korozivzdorná. Ochranná pasivační vrstva se vytváří i po třískovém obrábění kovu nebo po tváření, typickým příkladem jsou kuchyňské nože z korozivzdorné oceli, které i přes jejich časté používání a ostření (tedy broušení) si stále zachovávají svoji korozní odolnost. I přes tuto pasivační vrstvu se lze setkat s určitými lokálními druhy koroze v závislosti na prostředí, kde ocel plní svou funkci jako je např. šterbinová, bodová a mezikrystalová koroze. Jediným prostředím, kde ochranná pasivační vrstva zaniká je při kontaktu s kyselinou sírovou a solnou. Kromě již zmíněných prvků se přidávají další prvky, které samotnou odolnost a vlastnosti zlepšují, např. nikl (zvyšuje korozní odolnost, zlepšuje mechanické vlastnosti i při nízkých a vysokých teplotách) nebo molybden (zvyšuje prokalitelnost, zlepšuje svařitelnost a jemnost zrna, přispívá na korozní odolnost a odolnost proti vytváření důlkové koroze), niob (přidává se jako stabilizátor pro zvýšení odolnosti proti chemikáliím), titan (přispívá k zjemnění zrna), dusík (stabilizuje austenit a zvyšuje pevnost i mechanické vlastnosti za tepla) a síra (zlepšuje obrobitelnost díky mazacím účinkům ale zvyšuje možnost křehkého lomu při svařování). Jednotlivé prvky, které svým kontaktem přímo ovlivňují materiálové vlastnosti jsou popsány tab. 8, a používají se nejčastěji pro legování korozivzdorných ocelí. [39; 41; 42]



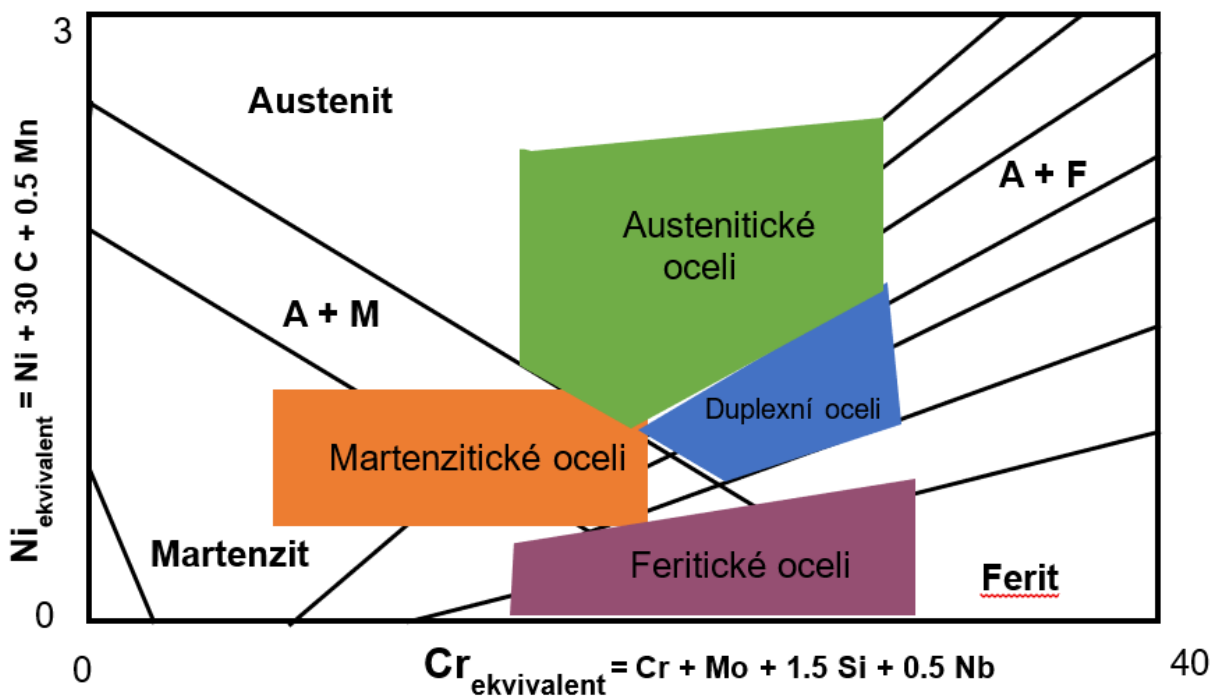
Obr. 25 Schéma pasivační vrstvy korozivzdorných ocelí [46]

Tab. 8 Vlastnosti legujících prvků ovlivňujících korozivzdorné ocelí [41].

Prvek/Vlastnost	S	Cr	Ni	S	Mn	Si	P	Cu	Mo	Se	Ti, Nb
Odolnost proti korozi		+	+	-			+		+		
Mechanické vlastnosti	+	+			+	+	+	+	+		+
Odolnost proti vysokým teplotám		+	+	-					+		+
Obrobitelnost	-	-		+			+			+	
Svařitelnost	-	-		-	+		-		+		+
Odolnost za studena	-	-	+	-				+			

Legenda: + pozitivně ovlivňuje, - negativně ovlivňuje

Dle normy EN 10088 lze korozivzdorné oceli rozdělit na základní tři skupiny dle mikrostruktury (austenitické, martenzitické a feritické oceli), která je ovlivněna obsahem jednotlivých legujících prvků. Dnes se již využívají také tzv. duplexní oceli, které jsou kombinací již zmíněných typů a získávají se tím materiály s lepšími vlastnostmi, než mají základní korozivzdorné oceli. Hlavními rozdíly ve složení je poměr chromu a niklu, který se podílí i na výsledné ceně dané oceli. Nejjakostnější nerezové oceli mají vysoký obsah niklu, jenž zvyšuje mechanické vlastnosti oceli. Oceli s vyšším obsahem chromu jsou naopak vzhledem k dostupnosti levnější, ale neposkytují tak dobré mechanické vlastnosti, naopak jsou odolné vůči agresivnímu prostředí. Pro snadnější rozdělení ocelí se využívá Schaefflerova diagramu, který slouží pro určení teoretické mikrostruktury pomocí Ekvivalentu chromu (tj.  $Cr_{ekvivalent}$ ) a niklu (tj.  $Ni_{ekvivalent}$ ). Tyto ekvivalenty se stanovují z hodnot přesného chemického složení získaných z Atestu. Na základě získaných hodnot ekvivalentů se vynese do grafu a zjistí se složení pro konkrétní ocel. Vzorový Schaefflerův graf s oblastmi jednotlivých korozivzdorných ocelí je znázorněn na obr. 26. [39; 40; 41]



Obr. 26 Schaefflerův diagram s druhy korozivzdorných ocelí [41]

### Martenzitické oceli

Tyto materiály se vyznačují velmi nízkým obsahem chromu a niklu, díky čemu jsou nejlevnější variantou ze všech typů korozivzdorných ocelí. Jsou magnetické a často je v nich obsaženo vyšší množství uhlíku než u feritických ocelí. S přítomností vyššího množství uhlíku lze martenzitické oceli kalit a tepelně zpracovávat. Všeobecné složení martenzitických ocelí, které se liší v závislosti na konkrétním typu oceli, je popsáno v tab. 9. Nejčastěji se kvůli své vysoké pevnosti, tvrdosti a korozní odolnosti využívají v neagresivním prostředí. Mají sklon k vodíkové křehkosti, popouštěcí křehkosti a koroznímu praskání pod napětím. Poddruhem tohoto typu jsou supermartenzitické nerezové oceli, které mají velmi dobrou svařitelnost s nízkým obsahem uhlíku a vyšší korozní odolností. Vzhledem k vyššímu obsahu uhlíku jsou právě martenzitické oceli hůře svařitelné a doporučuje se předehřev (70 – 150 °C), pro zamezení vzniku křehké a tvrdé fáze v základním materiálu jsou často svařovací procesy doprovázeny řízeným ochlazováním, žiháním a následným dochlazováním. Často se martenzitické oceli používají v hydroenergetice na výrobu turbín, převodovek nebo lopatek. [39; 40; 41; 42]

Tab. 9 Chemické složení Martenzitické oceli [41].

Prvek	Uhlík C	Chrom Cr	Molybden Mo	Nikl Ni	Vanad V
Obsah [%]	≤ 1,5	10,5 – 17	0 – 2	0 – 3	≤ 0,2

### Feritické oceli

Magnetické oceli s nízkým obsahem uhlíku, které svými vlastnostmi hodně připomínají konstrukční oceli. Disponují lepší korozní odolností, obsahují více chromu a méně niklu, jsou tedy cenově dostupnější variantou. Odhadované chemické složení feritických ocelí, které se mění dle konkrétního typu oceli, je popsáno v tab. 10. Svařitelnost feritických ocelí závisí přímo na chemickém složení legujících prvků. Moderní typy ocelí s určitým množstvím martenzitu jsou dobře svařitelné, ale všeobecně jsou feritické oceli charakteristické velkým růstem zrna v teplotně ovlivněné oblasti při teplotě 950 °C, které přímo ovlivňuje snižování houževnatosti. Při svařování je limitovaná teplota Interpass a je nutné dbát na množství vneseného tepla do svarového spoje. Pro eliminaci vzniku trhlin a praskání při ochlazování je doporučeno pro tyto oceli používat předehřev. Typickým příkladem využití je pro výfuky a katalyzátory automobilů, kuchyňské dřezy a přístroje a pro zařízení pracující v agresivním prostředí (mořská voda). Vhodnými technologiemi pro svařování feritické oceli je MIG, MAG, WIG a ruční obloukové svařování obalenou elektrodou nebo elektronové a laserové svařování. [39; 40; 41; 42]

Tab. 10 Chemické složení Feritických ocelí [41].

Prvek	Uhlík C	Chrom Cr	Molybden Mo	Nikl Ni
Obsah [%]	≤ 0,08	10,5 – 30	≤ 4,5	0 – 5

### Austenitické oceli

V průmyslu nejpoužívanější korozivzdorná ocel díky své schopnosti se dobře tvářet, svařovat a díky odolnosti vůči přímořským, teplotně zatěžovaným nebo chemickým prostředím. V porovnání s martenzitickými a feritickými oceli dosahuje austenitická ocel největší korozní odolnosti. Obsahuje minimálně 16,5 hm. % Cr a minimálně 6 hm. % Ni pro stabilizaci struktury a zachování tažnosti a houževnatosti v teplotách okolo 600 °C. Vlivem obsahu niklu se vyvíjí FCC krystalografická mřížka, díky které tyto oceli dosahují i dobrých mechanických vlastností při kryogenních teplotách. Nejběžněji používaný typ této korozivzdorné oceli je X5CrNi 18-10, od kterého byl vytvořen nespočet zástupců, jenž byly dolegovány různými prvky pro dosažení vyšší odolnosti proti důlkové korozi (Mo) nebo zvýšení pevnosti (N). Všeobecné chemické složení pro tento typ ocelí je popsáno v tab. 11, které popisuje všeobecné

obsahy jednotlivých prvků, liší se dle vybraného typu oceli. Austenitické korozivzdorné oceli jsou žáruvzdorné, žárupevné a vlivem tváření mají tendenci zpevňovat. Ze zmíněných typů ocelí jsou vlivem obsahu niklu nejdražším druhem materiálu s korozní odolností, ale svými vlastnostmi jsou vhodnou volbou pro – stavby v agresivním prostředí (mořská voda) nebo teplotně zatížených instalacích. Často své využití nachází díky odolnosti proti chemikáliím v potravinářském průmyslu i kvůli snadnému čištění. Tyto materiály disponují velmi dobrou svařitelností při různých typech svařovacích technologií. Avšak použití přehřevu se nedoporučuje z důvodu rizika precipitačního vytvrzování karbidu chromu. Při svařování je nutné brát ohled na malou tepelnou vodivost ale i na velký koeficient tepelné roztažnosti. Po svařování není nutné austenitické korozivzdorné oceli tepelně zpracovávat. Pokud je to nutné, doporučuje se rozpouštěcí žihání, u kterého je riziko nauhličení materiálu. Ve většině případů se tyto oceli dodávají jako jednofázové se strukturou austenitu. Vlivem svařování může dojít v tepelně ovlivněné oblasti k přeměně na ferit. Právě kvůli možnému výskytu feritu se zvyšuje tendence k tvorbě trhlin za tepla a mezikystalové koroze, který je charakteristický pro austenitické oceli při svařování. Samotný obsah feritu v austenitických ocelích ovlivňuje korozní odolnost, houževnatost i odolnost proti vzniku trhlin za horka. [39; 40; 41; 42]

Tab. 11 Chemické složení austenitických ocelí [41].

Prvek	Uhlík C	Chrom Cr	Molybden Mo	Nikl Ni
Obsah [%]	≤ 0,10	16 – 26	0 – 5	8 – 40

### Duplexní oceli

Speciální skupinou korozivzdorných ocelí jsou tzv duplexní oceli, tedy dvoufázové oceli, které kombinují vlastnosti jednotlivých typů s cílem eliminace negativních vlastností. Do této skupiny se řadí austeniticko-feritické oceli a martenziticko-austenitické oceli. [39; 42]

### Austeniticko-feritické oceli

Tyto oceli převážně obsahují přibližně stejný podíl feritu a austenitu, za účasti 20 – 22 % Cr a 4 – 5% Ni (ačkoli se chemické složení může lišit dle tab. 12), celkové množství podílu feritu se váže na obsah feritotvorných a austenitotvorných prvků. Vlivem jemnozrnné struktury se dosahuje daleko lepších mechanických vlastností (mez kluzu 400 – 600 MPa) než u běžných austenitických ocelí (mez kluzu 200 MPa), dají se lépe obrábět, zaručují dobrou svařitelnost i odolnost proti korozi pod napětím. Velkou výhodou tohoto druhu oceli je odolnost proti křehkému porušení, z důvodu feritické oblasti (zrna), která tvoří bariéru proti šíření trhlin vznikajících v austenitické fázi. Na základě nižší tepelné roztažnosti oproti austenitickým ocelím dochází k menší roztažnosti a po svařování je menší zbytkové pnutí ve svarech, díky tomu svary mají menší tendenci vytvářet trhliny v tepelně ovlivněné oblasti. Nevýhodou těchto ocelí je snížená strukturní stabilita, která je omezena teplotou nad 300 °C. Při svařování je doporučováno použít přídavného drátu, ale není potřeba přehřev. Nejčastěji se využívají na nádrže pro chemický a petrochemický průmysl, potrubní systémy konstrukce nebo na nástroje do lomů. [39; 42]

Tab. 12 Chemické složení Austeniticko-feritických ocelí [41].

Prvek	Uhlík C	Chrom Cr	Molybden Mo	Nikl Ni
Obsah [%]	≤ 0,03	16– 28	3 – 3,5	4 – 6

### Martenziticko-austenitické oceli

Tento typ ocelí byl původně vymyšlen na výrobu vodních turbín a také s cílem eliminovat vlastnosti klasických martenzitických ocelí jako je nízká vrubová houževnatost, zhoršená svařitelnost a nízká odolnost proti opotřebení a proti kavitačnímu opotřebení. Výhradou této oceli je její použití pouze v zušlechťeném stavu, které se získává normalizačním žíháním, kalením a popouštěním. Po tomto kroku tyto oceli dosahují pevností až 750 – 850 MPa, ale je u nich zvýšená vrubová houževnatost. Tento typ oceli se často označuje čistě jako martenzitická ocel, od níž se odlišuje hlavně kvůli nízkému obsahu uhlíku a liší se legujícími prvky (Mo, Cu, Nb). Jednotlivé obsahy prvků obsahující tyto oceli jsou zobrazeny v tab. 13. [39; 42]

Tab. 13 Chemické složení Martenziticko-austenitické oceli [41].

Prvek	Uhlík C	Chrom Cr	Molybden Mo	Nikl Ni
Obsah [%]	≤ 0,03	13 – 17	0 – 4	4 – 6

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole bude popsán experiment diplomové práce, která se zabývá porovnání technologií ručního laserového svařování a svařování metodou TIG. Táto práce byla vyhotovena ve spolupráci s firmou XY (nepřeje si být v práci zmíněna), která uvažuje o pořízení nového zařízení pro ruční laserové svařování (tato metoda je znázorněna na obr. 27). Cílem tohoto experimentu je vyhodnocení kvality svarových spojů připravených laserovým paprskem v přímém porovnání vůči spojům připravených stávající technologií TIG v jejich zakázkové výrobě. Pro dosažení cílů byl navrhnut materiál a typy svarových spojů. Následně byly oběma technologiemi svařeny a pro vyhodnocení budou na svarových spojkách provedeny zkoušky tvrdosti, makroskopie a tahová zkoušky, pro zjištění mechanických vlastností samotných svarů. Na závěr bude provedeno ekonomické zhodnocení.



Obr. 27 Schéma laserového svařování [44].

#### 3.1 Návrh experimentu

Pro experiment byl zvolen materiál X5CrNi 18-10 s tloušťkou plechu 2 mm, ze kterého byly vyrobeny plechy o rozměrech 150x150 mm připravené dělením laserového paprsku, které můžete vidět na obr. 28. Pro experiment byly vyhotoveny i plechy o stejných rozměrech s vyleštěným povrchem do zrcadlového lesku, pro zjištění vlivu povrchu materiálu při kontaktu s laserovým paprskem. Před samotným svařováním byly plechy důsledně očištěny a odmaštěny pro eliminaci vad vzniklých přítomností nečistot nebo olejů a tuků.

Svarové spoje byly pro experiment zvoleny následovně:

- Koutový svar
- Svar na tupo
- Koutový svar s přeplátováním



Obr. 28 Polotovary pro svařování experimentu.

### 3.1.1 Svařovací zařízení

Pro svařování vzorků byl použit laser od dodavatelské společnosti XY (firma si nepřeje být v práci zmíněna). Laserová svářečka LW1500H, která má nejvyšší výkon 1500W a byla spojena se svařovací pistolí HW960. Svařovací „pistole“ pro ruční laserové svařování je zmenšenou verzí optického systému (je znázorněn na obr. 29), která je schopná přenést výkon laserového paprsku i v několika kW (konkrétně tento model pistole je dimenzovaný na 2kW). Samotná pistole se skládá z robustního těla, ve kterém je uvnitř sada fokusačních čoček a krycích skel. Ze spodní části je přiveden optický kabel, který vede laserový paprsek ze zdroje společně s hadicemi přivádějícími ochranný plyn a chladicí médium pro udržování konstantní teploty pistole při procesu svařování. Dříve zmíněné fokusační čočky jsou hlavními činiteli správného vedení paprsku do procesu svařování, jelikož je s nimi možné samotný paprsek rozmítat dle nastavení (pohyb po kružnici, trojúhelníku nebo kmitavý pohyb) a požadované frekvence tzv. Wobbling zmíněný v kapitole 2.2.2. Soustava čoček je chráněna ochranným sklem, které zabraňuje vstupu nečistot, a zároveň neovlivňuje výstupní kvalitu laserového paprsku. Výstupní hubice je na konci osazena měděnou koncovkou, která se vyrábí v několika možných provedení, pro vhodnou volbu na daný svařový spoj (svařovací hubice jsou znázorněny na obr. 29). Při procesu svařování je nutné, aby tento díl byl celou dobu v kontaktu se základním materiálem, jinak by se skrze bezpečnostní obvod proces nespustil. Svařování laserovým paprskem je převážně metoda svařování bez přídavného materiálu, ale je možné svařovat materiál i s ním. Pro tento způsob je možné přidělat podavač přídavného drátu přímo na svařovací pistoli, která dodává materiál přímo do místa svařování podobně jako u technologie MIG/MAG jako je vidět na obr. 29. Pro účely této diplomové práce byla využita metoda svařování s přídavným drátem. Konkrétní svařovací parametry pro laserové svařování je zobrazený v tab. 14.



Obr. 29 Druhy svařovacích koncovek.



Obr. 30 Podavač na přídavný materiál.



Obr. 31 Svařovací pistole pro laserové svařování.

Svařovací zdroj, který je možné vidět na obr. 33, je složený z generátoru laserového paprsku, chladicího zařízení a dotykového ovládacího panelu. Pokud to technologie vyžaduje je možné připojit externí podavač drátu pro svařování s přídavným drátem. Zdroj a vodní chlazení je z bezpečnostních důvodů zakryté a zaopatřené zámek pro eliminaci obsluhy nezaškolenou osobou. Celé zařízení je ovládáno pomocí dotykového panelu, na kterém se nastavují veškeré svařovací parametry laserového paprsku, a popř. i rychlost podávání drátu, samotný ovládací panel je zobrazen na obr. 34. Vzhledem k jednoduchému ovládání je velkou výhodou rychlá změna parametrů. Ovládání laserového paprsku dokonce umožňuje přednastavení jednotlivých profilů svařování a díky tomu lze docílit rychlejší reakce na případnou změnu výroby.



Obr. 33 Svařovací zdroj



Obr. 32 Ovládací panel zdroje

Pro svaření vzorků technologií TIG bylo vybráno zařízení značky Fronius, model MAGIC WAVE 230i (zařízení je zobrazeno na obr. 34) který patří do nejprodávanější kategorie svařovacích inventurů na trhu. A to díky svojí jednoduché ovladatelnosti a snadné obsluze digitálního řídicího panelu. Toto svařovací zařízení je ideální volbou pro svařování korozivzdorných ocelí ale i pro svařování hliníku. Při svařování bylo pro obě technologie použito ochranné atmosféry argon 4.6, který je nejběžněji používaným ochranným plynem pro svařování TIG nebo MIG. Svařovací parametry nastavené pro experiment jsou detailně popsány v tab. 15.



Obr. 34 Svařovací zařízení TIG.

Tab. 14 Svařovací parametry pro laserové svařování.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Svařovací výkon	600	[W]
Frekvence paprsku	100	[Hz]
Rychlost podávání drátu	12	[mm·s <sup>-1</sup> ]
Průměr kruhu (Wobbling)	1,5	[mm]
Přídavný materiál 316 L	1	[mm]
Ochranný plyn Ar	12	[l·min <sup>-1</sup> ]

Tab. 15 Svařovací parametry pro TIG.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Svařovací proud	80	[A]
Napětí	10	[V]
Průměr elektrody	2,4	[mm]
Přídavný drát 316 L	1	[mm]
Ochranný plyn Ar	12	[l·min <sup>-1</sup> ]

Jednotlivé svařové spoje byly označeny dle typu svaru a použité technologie. Celkově bylo svařeno 8 vzorků jednotlivých typů svaru, ze kterých se po svaření připravily dílčí vzorky pro následné zkoušky. Jednotlivé vzorky s označením jsou vyobrazeny v tab. 16.

Tab. 16 Označení svařových vzorků.

Duh svaru	Použitá technologie	Označení
Koutový	TIG	KT1
	Laser	KL2
	Laser – lesk	KL3
Přeplátovaný	TIG	PT3
	Laser	PL4
Tupý	TIG	TT5
	Laser	TL6
	Laser – lesk	TL7

### 3.1.2 Svařovaný materiál

Pro samotný experiment byla zvolena korozivzdorná austenitická chrom-niklová ocel X5CrNi18-10 (s přesným chemickým složením v tab. 17, a mechanickými vlastnostmi v tab. 18), slangově nazývaná jako potravinářská ocel, která je jedním z nejčastěji vyskytujících se materiálů (s 33% podílem na trhu) pro konstrukční díly s mírným zatížením. Díky svému složení vykazuje nízkou magnetizaci, dobrou svařitelnost i bez přídavného materiálu, tvárnost, a dokonce je dobře leštitelná. Má vysokou odolnost proti korozi oproti martenzitické a feritické oceli. Nejčastější využití nachází v průmyslovém odvětví pro konstrukce nádrží,

v potravinářském průmyslu nebo architektuře a stavebnictví. Vyznačuje se i stálostí vůči okolnímu přirozenému prostředí (tj. vůči městské nebo venkovské atmosféře a vodě).

Tab. 17 Přesné chemické složení dle přiloženého Atestu v příloze č.12 (hmotnostní podíl v %).

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
≤ 0,026	≤ 0,624	≤ 1,726	≤ 0,160	≤ 0,0063	≤ 0,0562	18,457	8,228

Tab. 18 Mechanické vlastnosti svařovaného materiálu dle přiloženého Atestu v příloze č.12.

Mez kluzu Rp 0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A80 [%]
295	645	50,7

### Posouzení mikrostruktury dle Schaefflerova diagramu

Pro zjištění teoretického složení mikrostruktury korozivzdorných ocelí se používá Schaefflerova diagramu, jenž je přímo závislý na obsahu jednotlivých prvků, které oblast  $\gamma$  zužují (tyto prvky se nazývají feritotvorné) a rozšiřují (tyto prvky nazýváme austenitotvorné). Na základě obsahu těchto prvků se zavádí ekvivalent chromu  $Cr_{ekv.}$  a ekvivalent niklu  $Ni_{ekv.}$ , díky kterým se stanoví hodnoty a zanesou se do grafu, po vynesení do grafu se zjistí konkrétní mikrostruktura řešené korozivzdorné oceli. Výsledný odhad teoretické mikrostruktury dle diagramu vyšla austenitická ocel s částečným obsahem martenzitu, poloha výsledku je znázorněna na obr. 35 červenou značkou.

Výpočet ekvivalentu Chromu:

$$Cr_{ekv.} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb \quad (3.1)$$

$$Cr_{ekv.} = 18,457 \% Cr + 0 \% Mo + 1,5 \cdot 0,624 \% Si + 0,5 \cdot 0 \% Nb$$

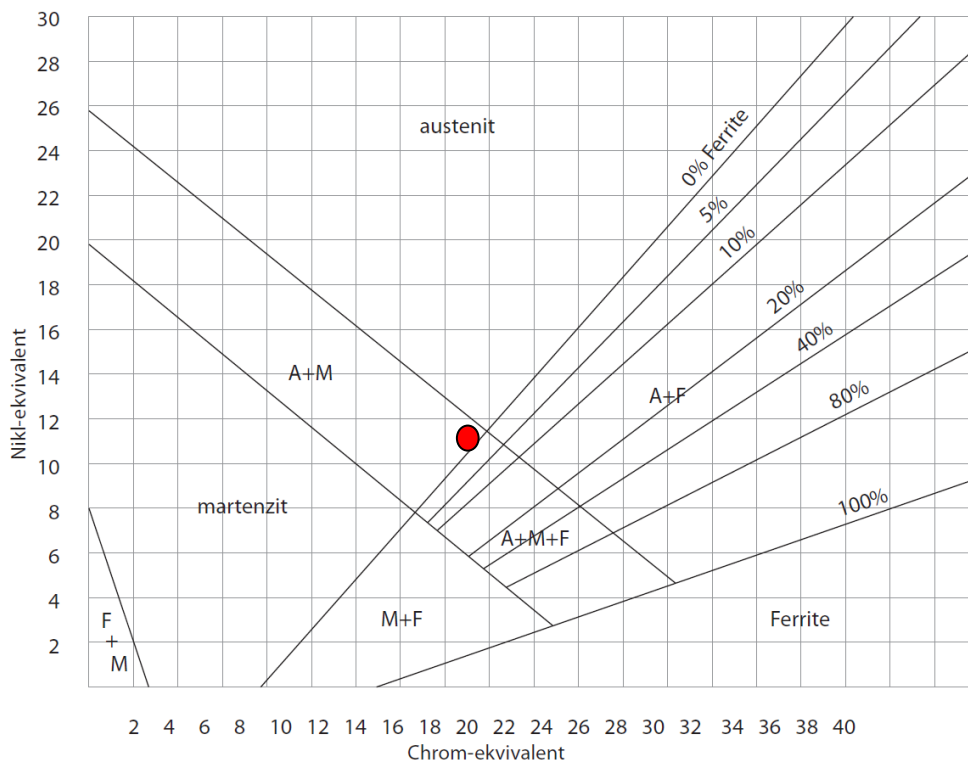
$$Cr_{ekv.} = 19,393 \text{ hm \%}$$

Výpočet ekvivalentu Niklu:

$$Ni_{ekv.} = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn + 30 \cdot \% N \quad (3.2)$$

$$Ni_{ekv.} = 8,228 \% Ni + 30 \cdot 0,026 \% C + 0,5 \cdot 1,726 \% Mn + 30 \cdot 0,0562 \% N$$

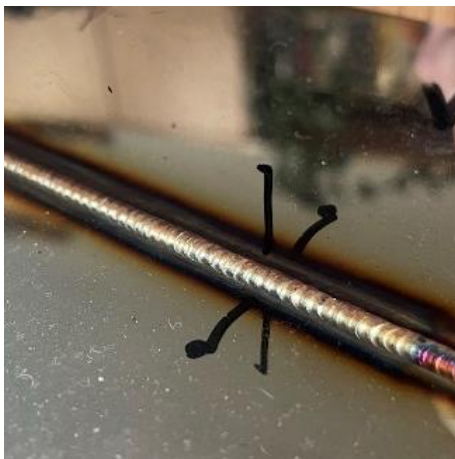
$$Ni_{ekv.} = 11,557 \text{ hm\%}$$



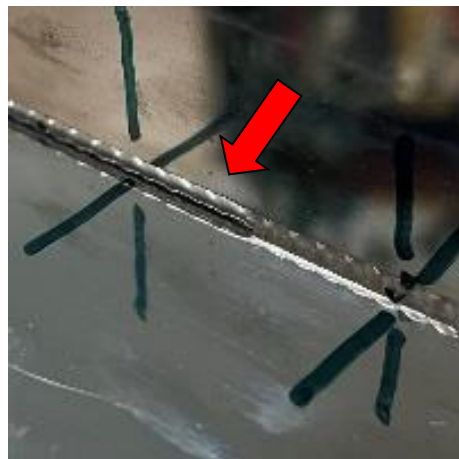
Obr. 35 Schéma Schaefflerova diagramu [40].

### 3.2 Vizuální kontrola

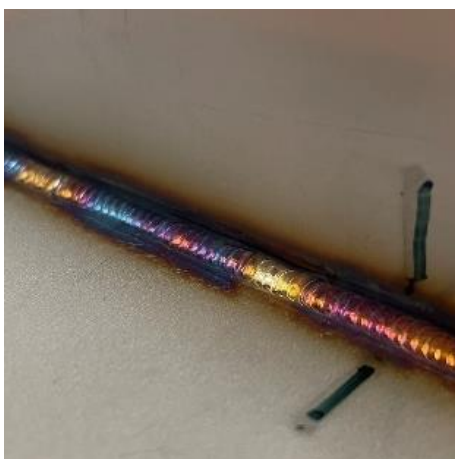
Po svaření jednotlivých typů svarů, byl hned na první pohled viditelný znatelný rozdíl mezi TOO a samotnou velikostí svarové housenky mezi jednotlivými technologiemi. Plechy svařené technologií TIG u koutových typů svaru se vyznačují výrazným barevným odstínem v místě svarového spoje, ale s kvalitním povrchem svaru bez trhlin, kráterů nebo pórů s dostatečnou výškou svaru. Pro lepší posouzení TOO obou technologií, byly svařeny i plechy se zrcadlově leštěným povrchem, které jsou vyobrazeny na obr. 36. Plechy svařené technologií laserového paprsku se vyznačují mnohem lepším vizuálním stavem oproti metodě TIG, a to absolutně nulovým zbarvením svarového spoje a jeho nejbližšího okolí. U jednoho vzorku svaru ale došlo k nesprávnému nastavení úhlu vedení laserové pistole a nedošlo k celistvému vytvoření svaru jako je vidět na obr. 38 (zvýrazněno šipkou). U koutových svarů připravených oběma technologiemi, na standartním plechu na obr. 37 a obr. 39, nebylo zjištěno žádných vizuálních vad, povrch svaru je bez známek trhlin nebo pórů. Vlivem velmi velkého vneseného tepla je u vzorku svařeného metodou TIG viditelné velké zbarvení TOO a zároveň je i lehce zkroucen. Oproti tomu vzorek připravený laserovým paprskem má zbarvení nulové.



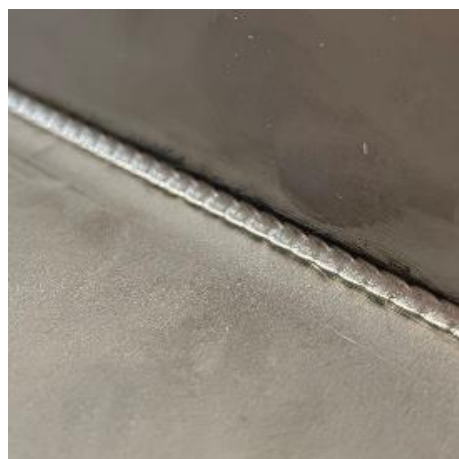
Obr. 36 Koutový svar metodou TIG na leštěném plechu.



Obr. 38 Koutový svar metodou laserového paprsku na leštěném plechu.

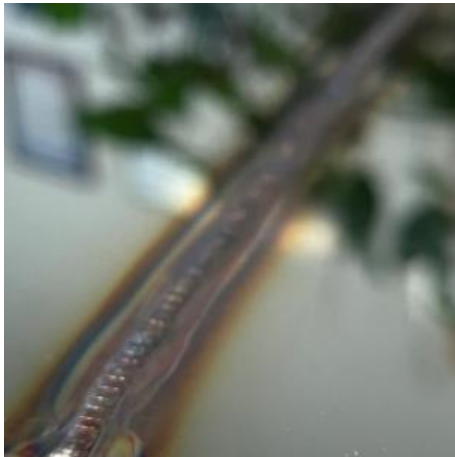


Obr. 37 Koutový svar metodou TIG.



Obr. 39 Koutový svar metodou laserového paprsku.

U tupých svarů svařených metodou TIG je kvalita povrchu svaru opět beze známek povrchových vad. První série svařených vzorků, jako je vidět na obr. 40, proběhla opět na leštěném plechu, na které se opět projevilo vlivem velkého vneseného tepla znatelná TOO s charakteristickým zbarvením a plech je vlivem tepla i lehce zkroucen. Oproti tomu svary vyhotovené pomocí laserového paprsku, znázorněno na obr. 42, jsou opět beze známek TOO a základní materiál není zkroucen vlivem menšího množství vneseného tepla. Druhá série vzorků byla svařena ze standartního plechu, kde nebylo zjištěno vizuálních vad ani u jedné z použitých technologií svařování. Okolí svaru u metody TIG je zbarveno vlivem vneseného tepla, kde laserový spoj je bez zbarvení, jako je znázorněno na obr. 41 a obr. 43. Svařování těchto spojů pomocí laserového paprsku je docíleno, oproti koutovému svaru, kde je svařovací pistole ve dvojbodovém kontaktu, pomocí vodícího pravítka (jedná se o jakýkoli plech s rovnou hranou), díky kterému je možné provést svarovou housenku v takové délce a rychlosti na jeden průchod. Vedení laserové hlavy bez pravítka je náročné a nedoporučuje se. Správné nastavení svařovacího paprsku usnadňuje laserová dioda, který se promítá na povrch svařovaného plechu před zahájením procesu. Takto je tedy možné správně přiložit pravítko a zkontrolovat nastavení dráhy svarové pistole, popř. změnit charakteristiku Wobblingu nebo změnit samotnou svařovací hubici.



Obr. 40 Tupý svár metodou TIG na leštěném plechu.



Obr. 42 Tupý svár metodou laserového paprsku na leštěném plechu.



Obr. 41 Tupý svár na metodou TIG.



Obr. 43 Tupý svár metodou laserového paprsku.

U překlátovaných plechů byly vzorky svarů vyhotoveny pouze z obyčejného plechu. Povrch svaru je u TIG metody opět stejný jako u předešlých typů svaru, tedy bez povrchových vad a s viditelnou TOO, která opět ovlivňuje i zkroucení plechu. Svarový spoj pomocí laserového paprsku je bez známek TOO a s minimálním ovlivněním zkroucení plechu, povrch svaru je bez vad. Svařené vzorky jsou vidět na obr. 44 a obr. 45. Ze všech vzorků byly vybrány části svarů pro následné měření, vzorky byly připraveny pomocí dělicího zařízení CNC-Clinic (plazmová dělička materiálu).



Obr. 44 Koutový překlátovaný svar metodou TIG.



Obr. 45 Koutový překlátovaný svar metodou laserového paprsku.

### 3.3 Makroskopie svarů

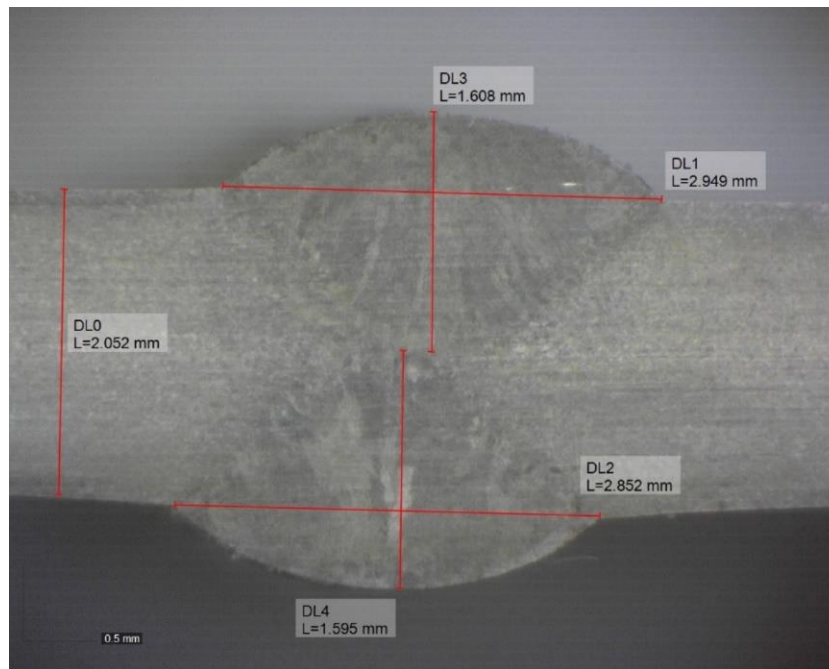
Měření makroskopie vybraných typů svarů (tupý, koutový) probíhalo na měřicím zařízení SCHUT, model SSM-EC2, který je znázorněn na obr. 46. Tento stereo mikroskop je osazen snímacím zařízením Dino Lite s připojením na počítačový program Dino Capture, ve kterém je možné vyhodnocování vzorků. Toto zařízení je pro účely práce plně dostačující, lze ho využít pro vyhodnocování makro i mikrostruktury vyleptaných vzorků. Jednotlivé vzorky byly připraveny pomocí dělení a vybroušeny na metalografickém zařízení s následným vyleptáním pro detailní vyobrazení struktury svarového spoje a základního materiálu. Takto připravené vzorky byly ustaveny do svěraku a vyhodnoceny.



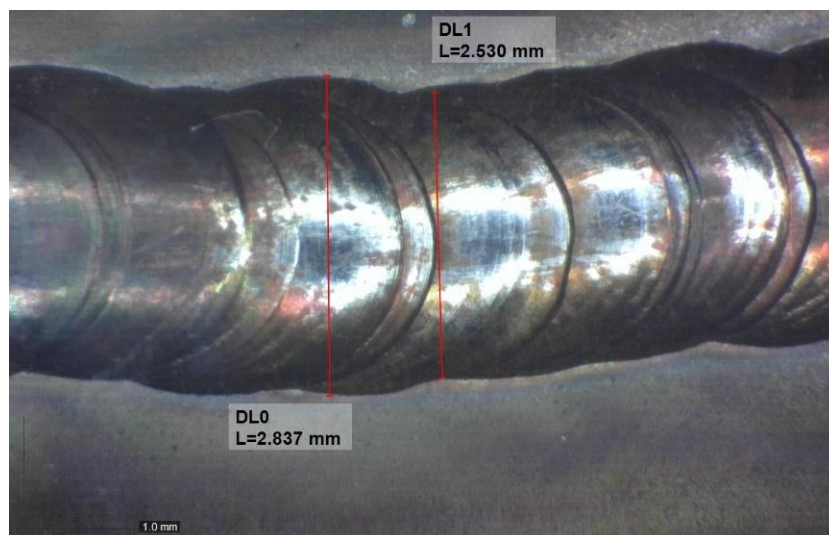
Obr. 46 Stereomikroskop SCHUT [45].

## Tupé svary

První měření probíhalo na vzorku s názvem TT5, který byl svařen metodou TIG. Dle měření je patrné, že nejširší místo svaru před vybroušením je 2,837 mm, dle obr. 48. Povrch svaru je celistvý a bez vad. Avšak po vybroušení, na obr. 47 byla změřena největší šířka svaru – a to 2,949 mm. Největší hloubka průvaru je 1,608 mm na konkrétním vzorku, které je hodnoceno jako dostatečné, jelikož je provařen v celé tloušťce základního materiálu. Svarový spoj je jinak bez vnitřních vad a splňuje náležitosti daného spoje.



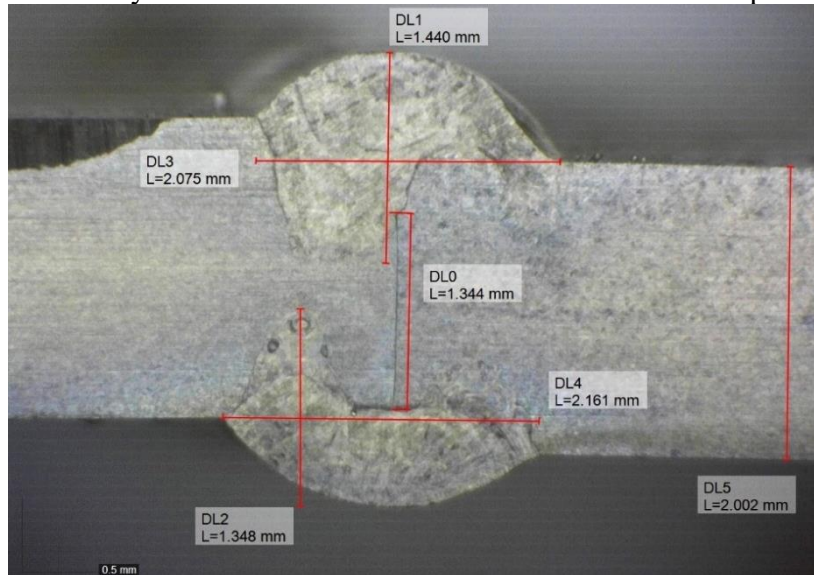
Obr. 47 Makroskopie tupého svaru vytvořeného metodou TIG.



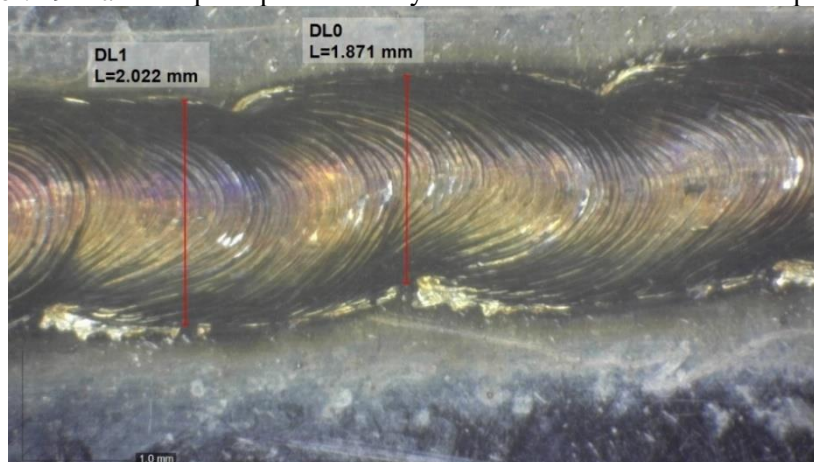
Obr. 48 Pohled na svarovou housenku vytvořeného metodou TIG.

Druhé měření následovalo na vzorku s označením TL6. Až po nadělení vzorku a vybroušení bylo zjištěno, že svarový spoj je absolutně nevyhovující. Ač byly svarové vzorky svařovány z obou dvou stran, nedošlo zde k dostatečnému provaření a materiály jsou k sobě prakticky „slepeny“ nataveným přídavným materiálem s částečným provařením. Velikost neprůvaru je dle měření na obr. 49. 1,344 mm. Největší šířka svarové housenky pro konkrétní zvolenou část spoje je 2,161 mm. Na obrázku je vidět nedokonalost rovinnosti základních materiálů, kde došlo

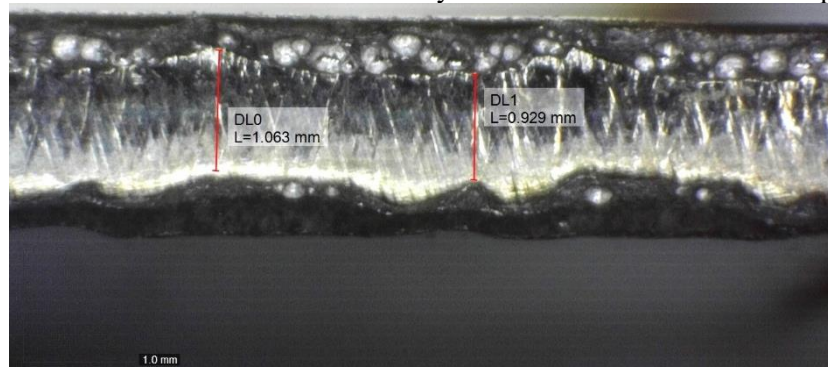
k přesazení, pravděpodobně za použití vodícího pravítka pro laserovou pistoli. Takto vytvořený svar je nevyhovující. Na obr. 50 je horní pohled na svarovou housenku. Po tahových zkouškách byly poté zjištěny póry v téměř celém průřezu, které byly způsobeny metodou svařování na tupo z obou stran. Při svaření jedné strany a následně druhé se mezi jednotlivými svary uzavřel vzduch, který pronikl do taveniny. Na obr. 51 je detailní pohled na tvar svarové housenky. Po tahových zkouškách byly zjištěny skryté vady ve svarovém spoji. Vlivem způsobu svařování a neprovaření se uzavřený vzduch dostal do svarové lázně a vznikla řada pórů.



Obr. 49 Makroskopie tupého svaru vytvořeného metodou laserového paprsku.



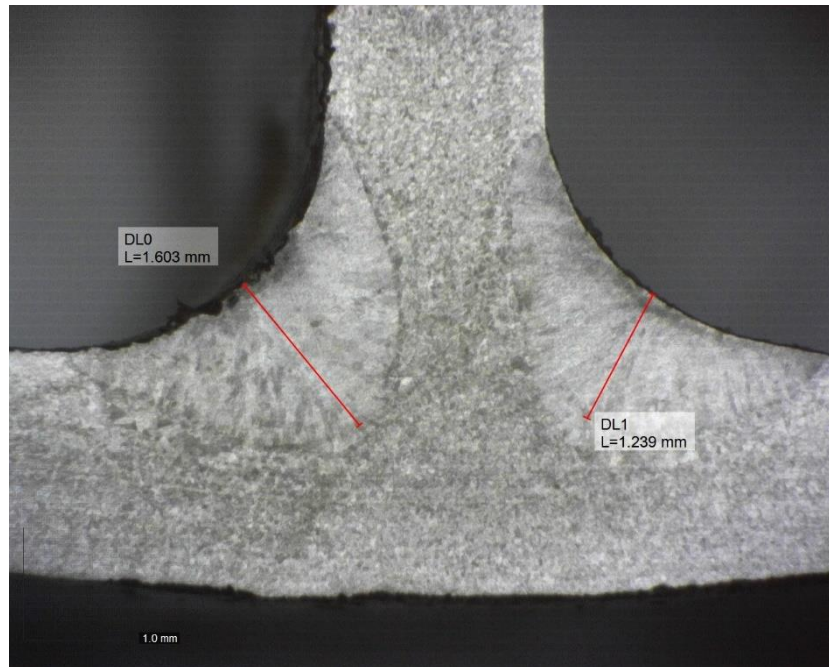
Obr. 50 Pohled na svarovou housenku vytvořeného metodou laserového paprsku.



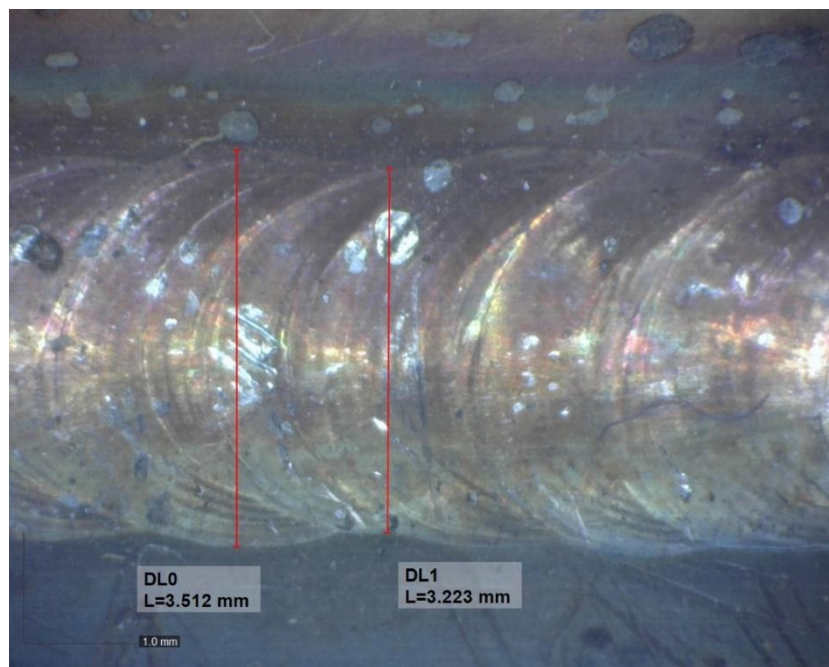
Obr. 51 Detail na lomovou plochu tupého svaru.

## Koutové svary

První měření bylo provedeno na koutovém svaru metodou TIG (tj. vzorek KT1). U tohoto vzorku se na obr. 52 dosáhlo výšky svaru po změření 1,603 mm. Svary na obou stranách mají dostatečnou hloubku provaření, jsou bez vad a tyto svary jsou tedy vyhovující. Povrch na obr. 53 je barevně ovlivněn vlivem TOO při svařování, viditelné nečistoty na svaru a jeho okolí jsou vytvořeny vlivem dělení pomocí plazmového hořáku, následně byly mechanicky očištěny.

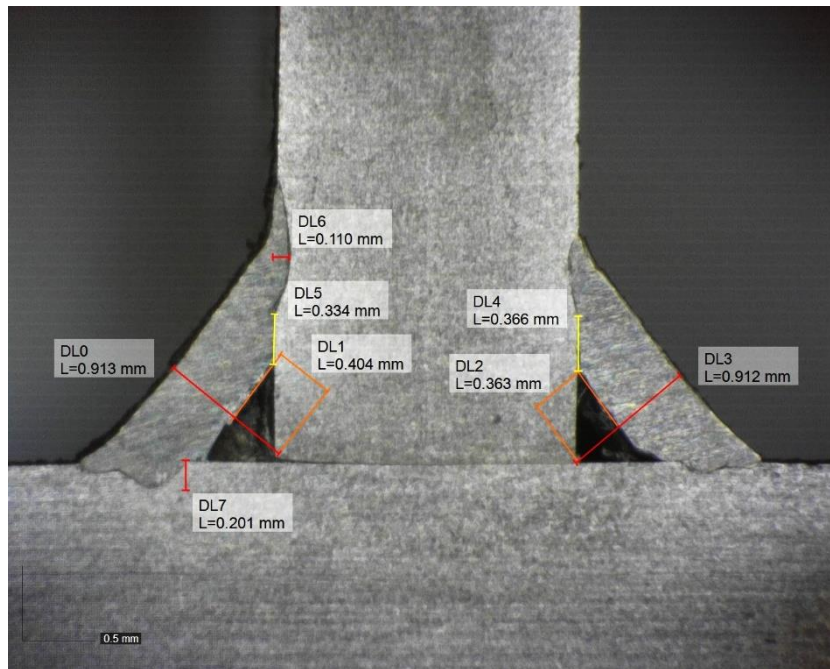


Obr. 52 Makroskopie koutového svaru vytvořeného metodou TIG.

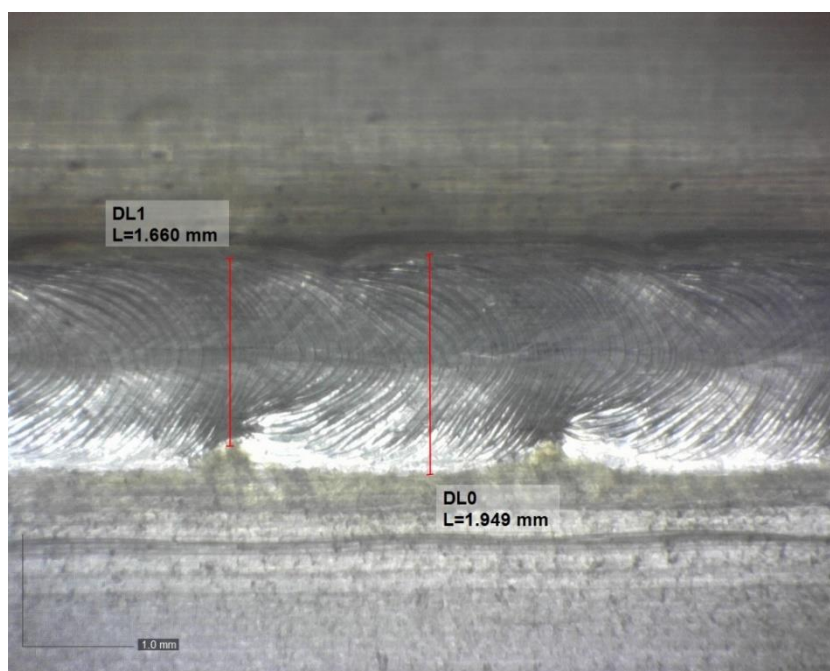


Obr. 53 Pohled na koutový svar vytvořeného metodou TIG.

Druhé měření probíhalo na vzorku KL1, který po vybroušení odhalil řadu vad vzniklých při svařování. Jako první jsou na obr. 54 vyobrazeny žlutou barvou vzdálenosti studených spojů, které při svařování vznikly (konkrétně 0,334 mm a 0,366 mm), důvodem je nesprávné nastavení svařovacího výkonu. Další vadou je zcela neprovařený kořen svaru, a tedy nevyhovující tvar koutového svaru, kde jeho velikost je zvýrazněna oranžově a velikosti jsou 0,404 mm a 0,363 mm. Jediným průvarem se základním materiálem jsou velmi malé úseky o hloubce 0,201 mm a 0,110 mm. Opakující se a naprosto totožné chyby na obou stranách koutového svaru, jsou důsledkem špatného nastavení technologie laserového svařování. Největší šířka svaru na obr. 55 je 1,949 mm a nejmenší 1,66 mm, kde tento rozdíl je způsoben rozmítáním paprsku laseru.



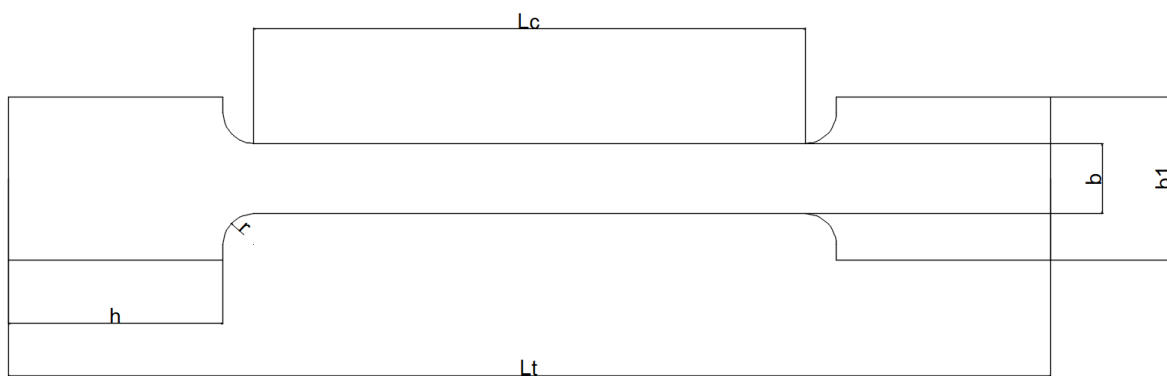
Obr. 54 Makroskopie koutového svaru vytvořeného metodou laserového paprsku.



Obr. 55 Pohled na koutový svar vytvořeného metodou laserového paprsku.

### 3.4 Tahová zkouška

Pro další měření ke zjištění mechanických vlastností svarových spojů (tupé, přeplátované) byla zvolena zkouška tahem. Samotné měření probíhalo v prostorách dílen Vysokého učení technického v Brně na stroji ZD 40 (přesné parametry stroje jsou v příloze č.13). Příčná tahová zkouška tahem je metoda pro zjištění materiálových mechanický vlastností, konkrétně pro hodnoty meze pevnosti  $R_m$  a mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Tato zkouška je prováděna na základě normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška probíhá pod plynulým zatížením až do přetržení zkušební tělesa. Právě pro tuto zkoušku byly pomocí plazmového hořáku připraveny zkušební tělesa jako je zobrazeno na obr. 56. Tato normalizovaná zkušební tělesa mají na koncích rozšířené hlavy, kvůli jednoduššímu upnutí do svěracích čelistí trhačích stroje. Rozměry těles jsou předepsány normou ČSN EN ISO 4136. Jednotlivé rozměry jsou  $h$  – délka hlavy upínacího konce,  $b_1$  – šířka hlavy upínacího konce,  $b$  – funkční šířka,  $L_o$  – funkční délka,  $L_t$  – celková délka,  $r$  – poloměr podpěr. Zkušební vzorky odebíráme ze svařence tak, aby osa byla ve středu zkoušené délky svarového kovu.



Obr. 56 Schéma vzorku pro tahové zkoušky.

#### Tupé svary

U tupých svarů bylo zhotoveno celkově 9 ks zkušebních vzorků, z toho 3 ks z laserového svařování ze vzorku TL6 a 3 ks ze vzorku TL7. Zbylé 3 ks byly vytvořeny ze vzorku TT5. Rozpis popisů jednotlivých vzorků je k vidění v tab. 19.

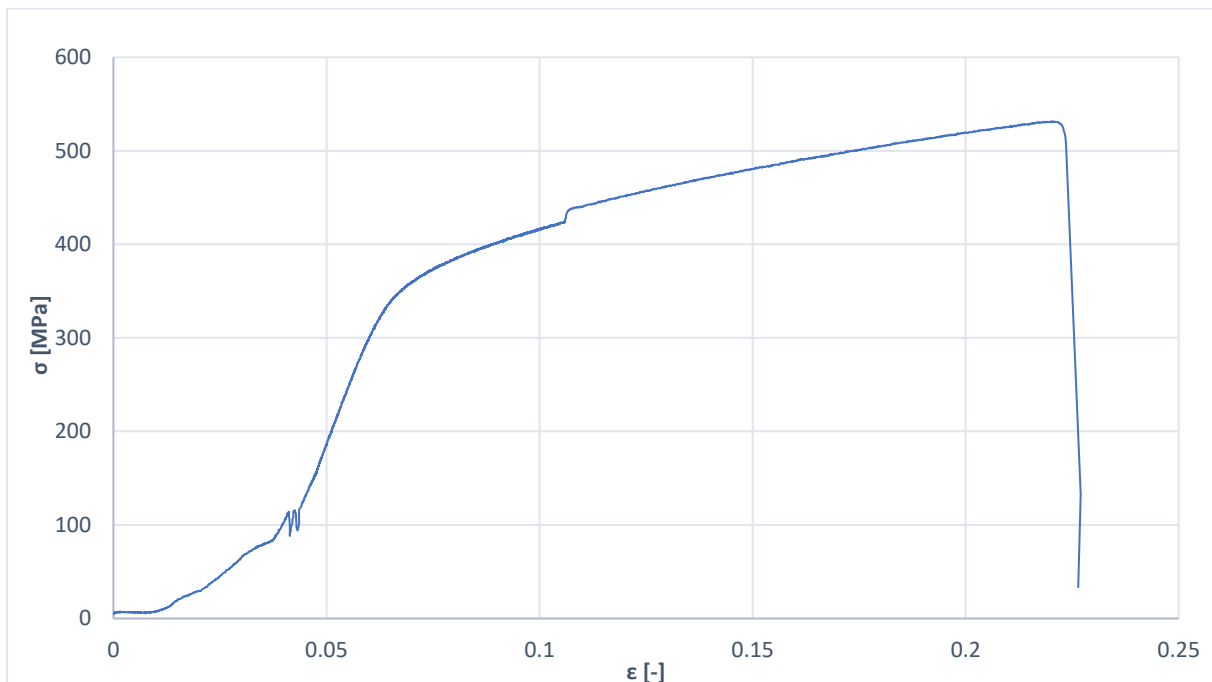
Tab. 19 Rozpis názvů vzorků pro tahové zkoušky tupých svarů.

LASER – TL6	1.1
	1.2
	1.3
LASER – lesk – TL7	1.4
	1.5
	1.6
TIG – TT5	2.4
	2.5
	2.6

#### Vzorek 1.1

Na obr. 57 je vyobrazeno zkušební těleso po tahové zkoušce ze vzorku 1.1, naměřené hodnoty z tahové zkoušky jsou v tab. 20. Přetrhlo se přesně ve svarovém spoji. Vlivem nesprávně svařeného vzorku a nedostatečného provaření došlo ke ztrátě pevnosti v nejslabším místě,

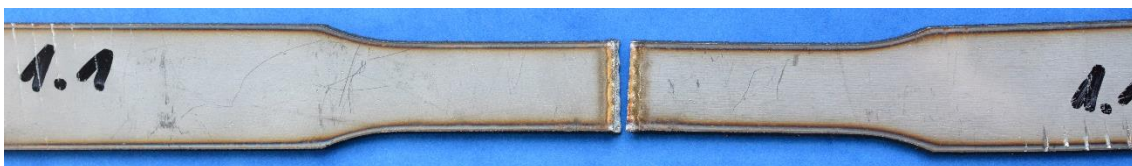
a tedy přímo ve svarovém spoji. Mez pevnosti dosáhla hodnoty 531 MPa, které nedosahuje stejných hodnot jako je mez pevnosti základního materiálu (Mez pevnosti základního materiálu 645 MPa). Dosažená mez kluzu byla 251 MPa, v porovnání s hodnotou základního materiálu je o 50 MPa menší (mez kluzu je 295 MPa). Průběh tahové zkoušky pro tento vzorek je vyobrazen na graf 1 a zbytek laserových svarových spojů (tj. vzorek 1.2 – 1.3), kde byly výsledky velmi podobné dosáhly místa přetržení vždy ve svarovém spoji. Další výsledky jsou přiloženy v přílohách.



Graf 1 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.1.

Tab. 20 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.1.

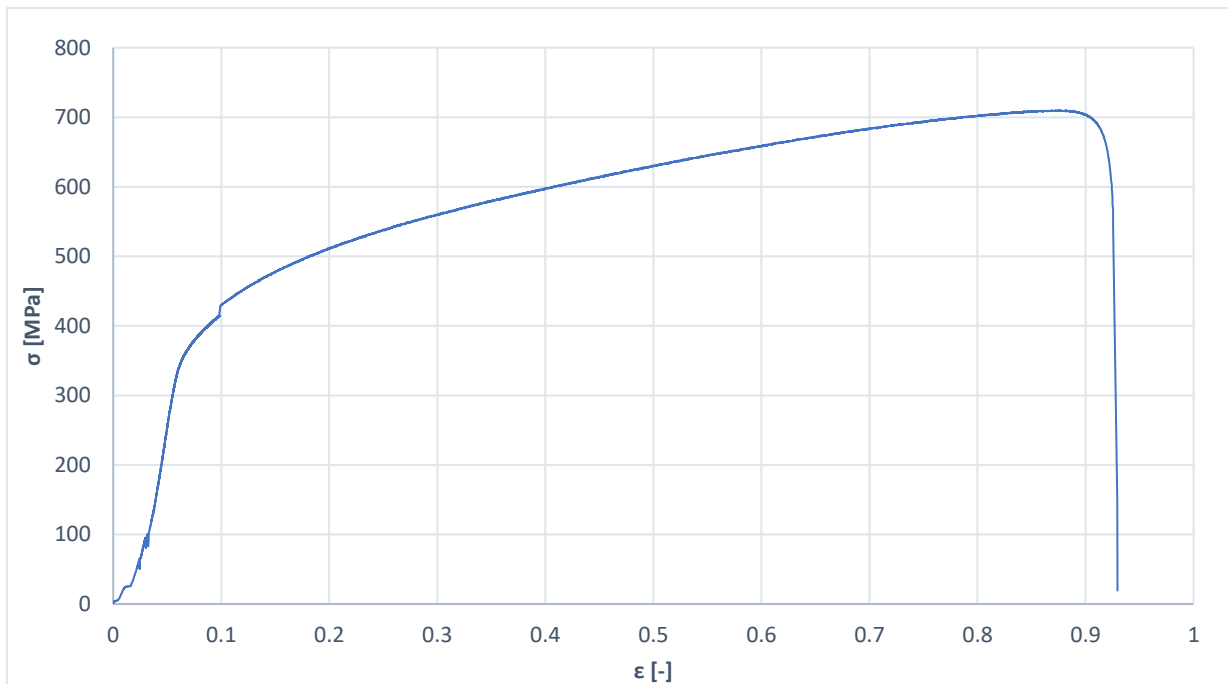
Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Lo	a [mm]	b [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]
251	531	14,81	50	1,85	14,36	26,566



Obr. 57 Vzorek 1.1 po tahové zkoušce.

#### Vzorek 2.4

Po tahové zkoušce je zkušební těleso zobrazeno na obr. 58, které společně s ostatními vzorky (tj. 2.5 – 2.6) dosáhlo místa porušení vždy v místě základního materiálu, mimo teplotně ovlivněnou oblast. Podrobné hodnoty z tahové zkoušky je v tab. 21. Porušení vzorku dosáhlo při překročení meze pevnosti na hodnotě 710 MPa, který výrazně převyšuje mez pevnosti základního materiálu (Mez pevnosti základního materiálu je 645 MPa). Mez kluzu při zkoušce bylo dosaženo při hodnotě 337 MPa. Na základě tohoto lze odvodit správně seřízenou technologii svařování a vhodnost pro tvorbu pevnostních spojů. V graf 2 je zobrazena křivka průběhu tahové zkoušky. Další hodnoty vzorků s grafy jsou přiloženy v příloze.



Graf 2 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.4.

Tab. 21 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 2.4.

$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]	$L_0$	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]
337	710	46	50	1,88	14,79	27,81



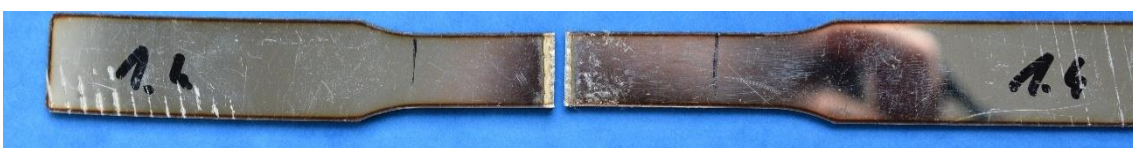
Obr. 58 Vzorek 2.4 po tahové zkoušce.

#### Vzorek 1.4

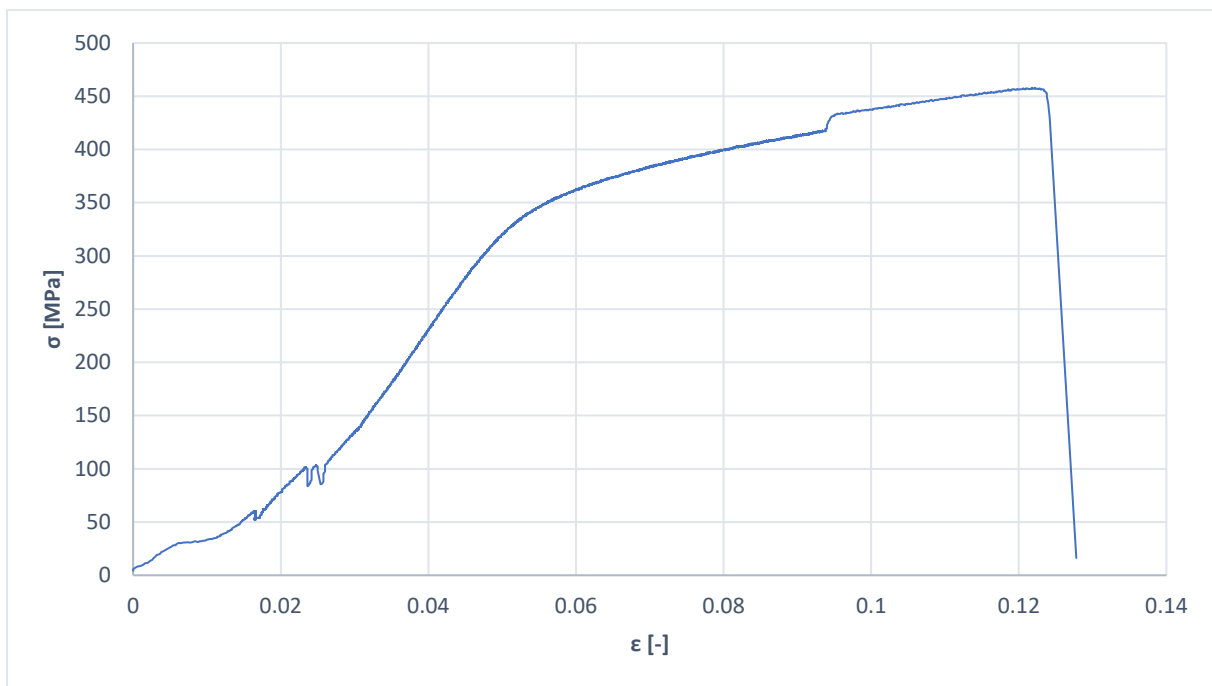
U vzorků z leštěného plechu bylo očekávána změna hodnot pevností skrze odrazivost laseru od povrchu při stejně nastavených svařovacích podmínkách. Hodnoty meze pevnosti byly změřeny 458 MPa, V porovnání se vzorky z obyčejného plechu je tato hodnota menší, mez kluzu byla změřena na hodnotě 258 MPa. Nižších hodnot bylo dosaženo a byl potvrzen předpoklad vlivu ztráty energie paprsku na leštěném plechu při svařování, který způsobil menší provaření. Pro svařování leštěného plechu je nutné navýšit svařovací výkon, nebo změnit ostatní parametry svařovacího procesu. Detailní hodnoty změřené tahovou zkouškou jsou v tab. 22 a vzorek po tahové zkoušce na obr. 59. Průběh tahové zkoušky je zobrazen na graf 3.

Tab. 22 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.4.

$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]	$L_0$	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]
258	458	7	50	1,86	14,27	26,54



Obr. 59 Vzorek tahové zkoušky 1.4.



Graf 3 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.4

### Překlátované svary

U překlátovaných svarů bylo vytvořeno 6 ks zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku (3 ks ze vzorku PT3 a 3 ks z vzorku PL4). Popis označení jednotlivých vzorků je v tab. 23. Velikost meze pevnosti a meze kluzu je poloviční kvůli dvojitě tloušťce materiálu vlivem překlátování základního materiálu v místě svahového spoje.

Tab. 23 Rozpis názvů vzorků pro tahové zkoušky koutových překlátovaných svarů.

Laser	TIG
1.7	2.1
1.8	2.2
1.9	2.3

### Vzorek 1.7

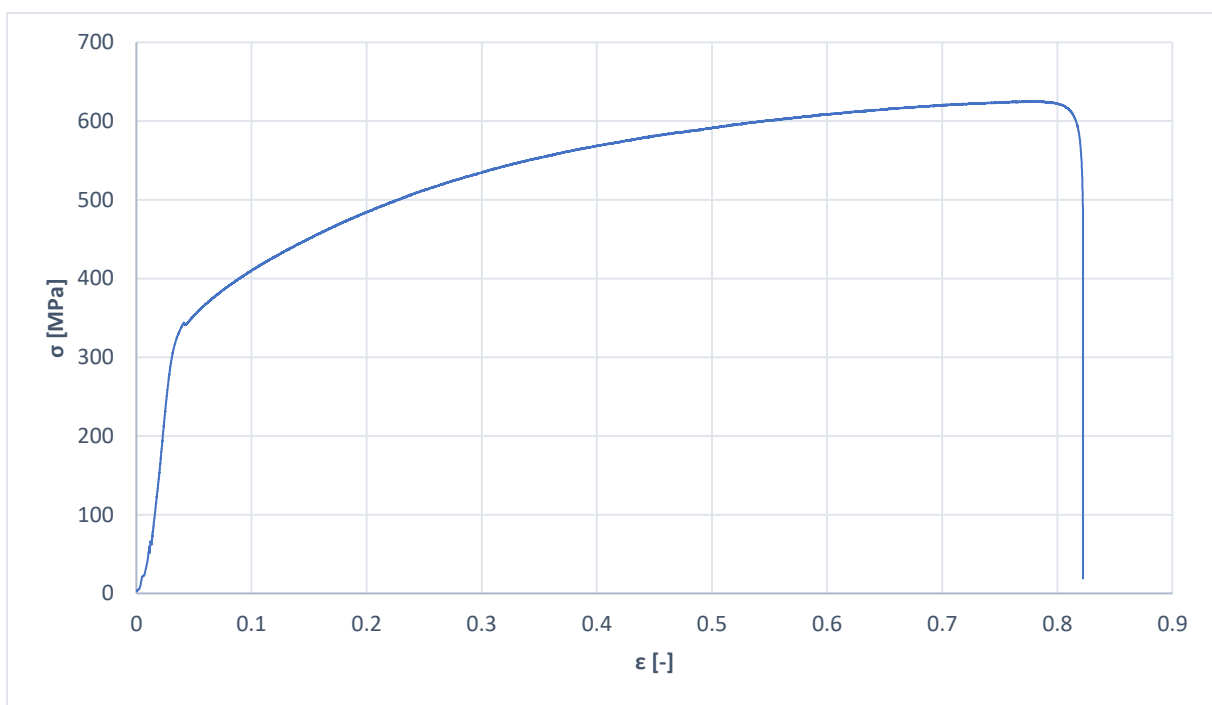
U překlátovaných koutových svarů vyrobených pomocí laserového paprsku dosáhlo porušení materiálu mimo TOO včetně vzorku 1.7. jako je vidět na obr. 60. Mez pevnosti zde dosáhla 624 MPa. Hodnoty meze kluzu byly naměřeny 354 MPa. Zbylé hodnoty jsou znázorněny v tab. 24. Průběh tahové zkoušky je zobrazen v graf 4. Výsledky ostatních vzorků jsou přiloženy v přílohách, včetně vzorků připravené metodou TIG.

Tab. 24 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.7.

Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
354	624	38	100	1,96	18,6	36,5



Obr. 60 Vzorek 1.7 po tahové zkoušce



Graf 4 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.7

Pro výsledné porovnání jednotlivých vzorků je v tab. 25 naznačeny nejdůležitější hodnoty naměřené při tahové zkoušce. Zbytek hodnot společně s grafy průběhu zkoušky jsou přiloženy v přílohách. Pro vzorek 1.2 byly hodnoty naneštěstí ztraceny vlivem exportu z vyhodnocovacího programu.

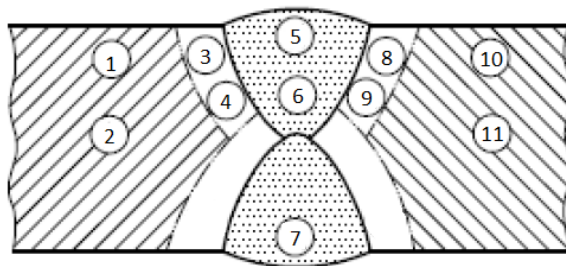
Tab. 25 Výsledky tahové zkoušky pro všechny vzorky.

Vzorek	Označení	Rm [MPa]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	A [%]
LASER tupý	1.1	531	251	10,4
	1.2	-	-	-
	1.3	532	321	13
LASER tupý lesk	1.4	458	258	7
	1.5	449	136	8
	1.6	396	333	8
TIG tupý	2.4	710	337	46
	2.5	727	286	50
	2.6	725	268	46
TIG přepl.	2.1	632	364	34
	2.2	644	365	35
	2.3	649	377	35
Laser přepl.	1.7	624	354	38
	1.8	630	288	37
	1.9	619	350	39

### 3.5 Zkoušky tvrdosti

Pomocí zkoušek tvrdosti lze dalším způsobem zjistit materiálové vlastnosti daného svarového spojení. Zjišťuje se výsledná tvrdost, pro získání představy o změně vlastností v místě svarového spoje jako je vidět na obr. 61 (pozice svarového spoje 5,6,7), teplotně ovlivněné oblasti (pozice 3,4,8,9) a také základního materiálu (pozice 1,2,10,11). Tvrdost je možné

definovat jako odpor materiálu proti vniku cizího tělesa dynamickým nebo statickým způsobem. Pro zjišťování mechanických vlastností svarových spojů se používají metody měření tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 9015-1, konkrétně statické metody Vickers a Brinell. Statické zkoušky probíhají vtlačování tělesa (indentoru) do materiálu silou, která se zvětšuje. Pro tuto práci byla zvolena technologie měření dle Vickerse [52], tedy jedna z nejpoužívanějších metod. Při měření se vtlačuje diamantový čtyřboký jehlan do povrchu zkušební tělesa. Průběh zkoušky probíhá při statickém vtlačování indentoru do materiálu předepsanou silou (zvoleno HV5 tedy síla vtlačování 49,03 N) po určitou dobu (10 – 15 s), kde se následně po odlehčení vyhodnotí šířky vtisků a vypočte výsledná hodnota tvrdosti. Při měření by nemělo docházet k otřesům zařízení, které by narušilo výsledky. Měření vzorků probíhalo pouze na tupých svarových spojkách ze vzorku TL.6 a TT.5, které byly použity i pro makroskopické zkoušky. Počet vtisků pro měření pomocí indentoru odpovídá schématu na obr. 61, kde se změřila tvrdost v základním materiálu, teplotně ovlivněné oblasti a ve svarovém spoji. [52]



Obr. 61 Schéma pozic měření tvrdosti [].

#### Výsledek měření pro laserové svařování

Hodnoty měření tvrdosti pro vzorek vytvořený laserovým svařováním, prokázaly změnu hodnoty tvrdosti s blížící se oblastí svarového spoje, resp. TOO. Maximální hodnoty tvrdosti byly naměřeny v základním materiálu (tj. 201 HV5) a nejmenší hodnoty ve svarovém spoji (tj. 179 HV5), v TOO byly hodnoty v rozmezí 190 – 195 HV5, zbytek hodnot je v tab. 26. Výsledkem tohoto měření je prokázání minimálních změn na struktuře kovu za použití laserového paprsku, který díky koncentraci paprsku eliminuje vznik velké TOO. Pokles tvrdosti je způsoben použitím přídatného materiálu, který má nižší tvrdost než základní materiál. Jednotlivé pozice měření odpovídají dle obr. 61, výsledky měření jsou zaznamenány v graf 5.

Tab. 26 Soupiska hodnot z měření tvrdosti vzorku TL.6.

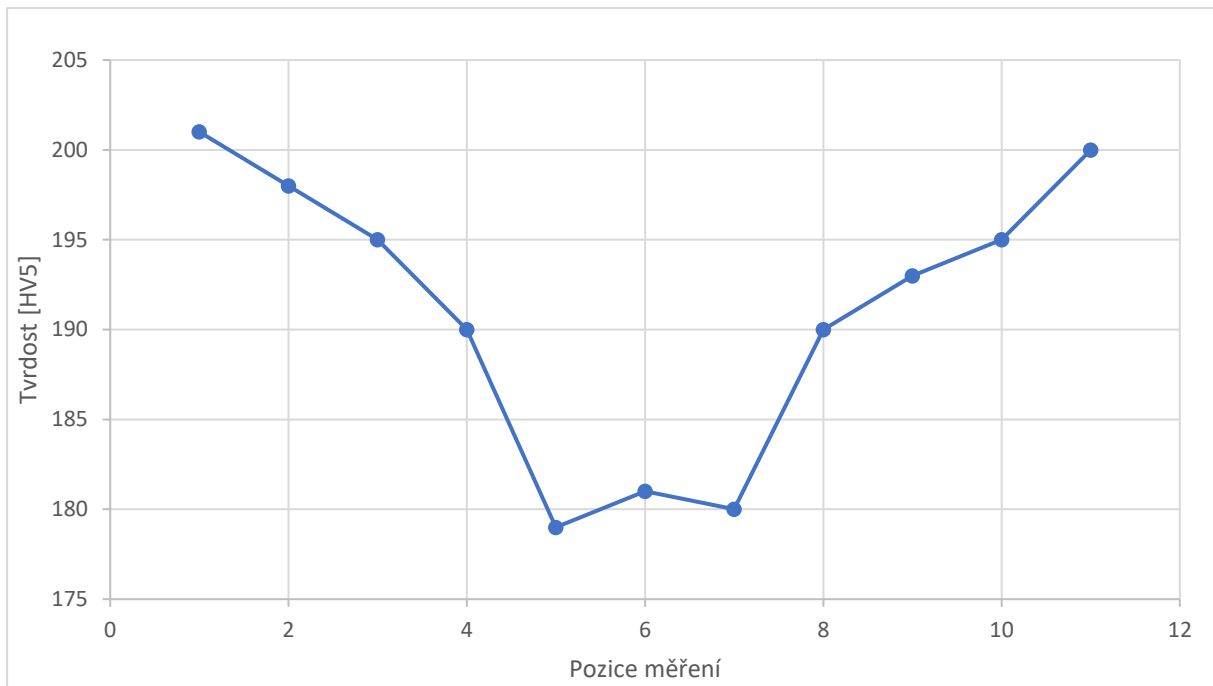
Pozice měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tvrđost [HV5]	201	198	195	190	179	181	180	190	193	195	200

#### Výsledek měření pro metodu TIG

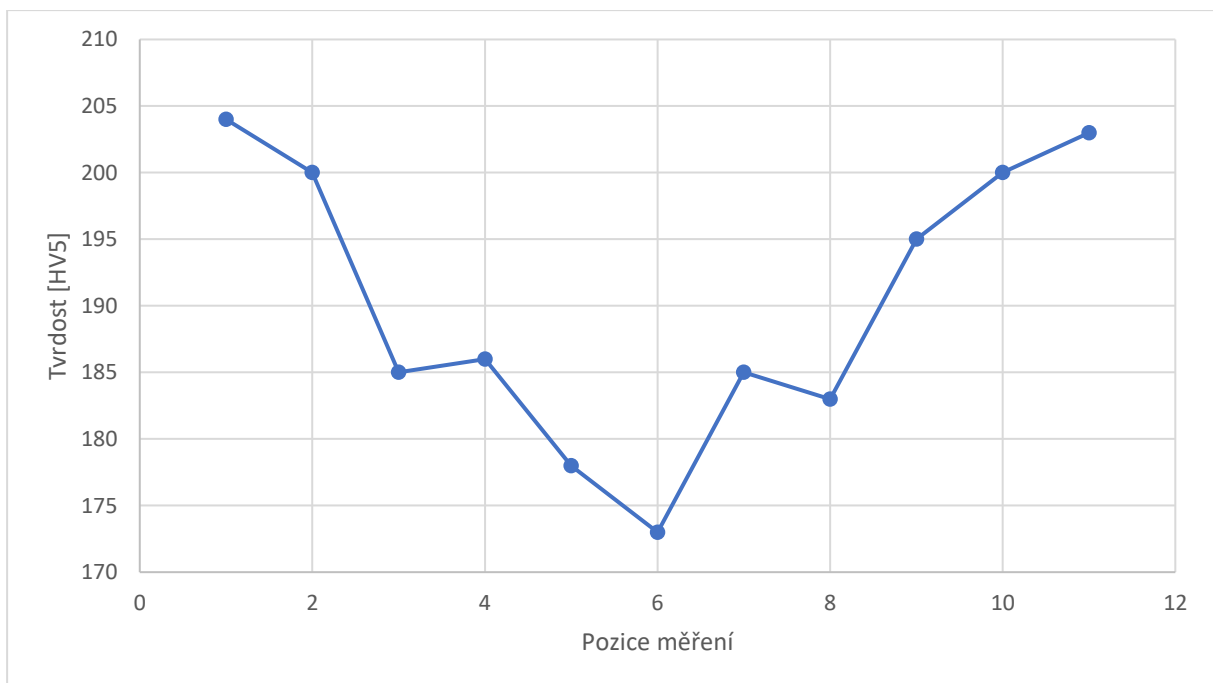
Hodnoty měření tvrdosti pro vzorek vytvořený metodou TIG, se projevily výraznější změnou tvrdosti v TOO a svarového spoje. Maximální hodnoty tvrdosti byly naměřeny stejně jako u předešlého vzorku v základním materiálu (tj. 201 HV5) a nejmenší hodnoty ve svarovém spoji (tj. 179 HV5). Hodnoty tvrdosti v TOO byly 180 – 195 HV5. Zbytek hodnot změřené tvrdosti je v tab. 27. Vlivem většího vneseného tepla je tato oblast více ovlivněná než u vzorku vytvořeného laserovým svařováním. Pokles tvrdosti je způsoben použitím přídatného materiálu, který má nižší tvrdost než základní materiál. Jednotlivé pozice měření odpovídají dle obr. 61, výsledky měření jsou zaznamenány v graf 6.

Tab. 27 Soupiska hodnot z měření tvrdosti vzorku TT.5.

Pozice měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tvrđost [HV5]	204	200	185	186	178	173	185	188	195	200	203



Graf 5 Hodnoty tvrdosti pro vzorek z laserového svařování.



Graf 6 Hodnoty tvrdosti pro vzorek z metody TIG.

---

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole je popsáno technicko ekonomické hodnocení obou použitých technologií s následným vyhodnocením vhodností dle získaných dat z měření a vypočtených výsledků.

### 4.1 Technické zhodnocení

#### Vizuální kontrola

U koutového svaru vytvořeného pomocí laserového paprsku bylo zjištěno vady špatně vyhotoveného svarového spoje vlivem špatně nastaveného úhlu a nepřesného vedení laserového paprsku, což zapříčinilo navaření roztaveného materiálu na stěnu základního materiálu, a tedy nedošlo ke správnému spojení. Doporučení pro eliminaci této vady, je snížit rychlost svařování a více dbát na správné držení úhlu vůči základnímu materiálu. U koutového svaru vytvořeného metodou TIG nebyl rozpoznány žádné viditelné vady, materiál je po svaření výrazně zbarvený oproti technologii laserového paprsku. U tupých a ani u přeplátovaných svarů nebyly rozpoznány žádné vizuální vady.

#### Makroskopie svarů

Po rozřezání svarových vzorků byly pod mikroskopem zjištěny vady, převážně u vzorků vytvořených laserovým paprskem. Konkrétně u koutových svarů byly zjištěny neprovařené kořeny (4021) a studené spoje (401). U tupých spojů byly zjištěny neprovařené kořeny (4021), přesazení základního materiálu a po tahové zkoušce byla dokonce odhalena vada řada pórů (2014). Pro eliminaci těchto vad je doporučeno zvolit vhodnější svařovací parametry, tedy snížit rychlost svařování, zvýšit výkon paprsku a změnit charakteristiku rozmítání paprsku. Takto vyhotovené svary jsou nevyhovující. Vzorky z technologie TIG nevykazovaly žádné vady, svary byly vyhovující s dostatečným průvarem.

#### Tahová zkouška

Při zkoušce tahem bylo odzkoušeno celkem 15 ks vzorků (9 ks tupých, 6 přeplátovaných). U vzorků přeplátovaného svarů obou technologií došlo ke stejným výsledkům, tedy přerušením v materiálu, a to mimo oblast svaru. U tupých vzorků vyrobené metodou TIG došlo k porušení také mimo oblast svarového spoje. Při zkoušce všech tupých svarů vytvořené laserovým paprskem se porušení projevilo přímo ve svarovém spoji, a to i u vzorků z leštěného plechu. Výsledkem je nižší pevnost svarového spoje při použití laserového paprsku (který nebyl správně nastaven pro dosažení správné jakosti svarových spojů). Nejnižší hodnota meze pevnosti byla dosažena  $R_m = 396$  MPa, oproti tomu nejvyšší hodnota meze pevnosti pro metodu TIG byla  $R_m = 710$  MPa.

#### Měření tvrdosti

Po změření tvrdosti bylo zjištěno u obou vzorků svařenců pokles tvrdosti ve svarovém kovu a v TOO. Výsledné hodnoty tvrdosti byly pro vzorek laserového svařování 201 HV5 v základním materiálu a 178 HV5 ve svarovém kovu. Pro metodu TIG byly hodnoty změřeny 204 HV5 v základním materiálu a 173 HV5 ve svarovém kovu.

#### Posouzení velikosti vneseného tepla

Velikou odlišností vybraných svařovacích technologií je množství vneseného tepla do materiálu. Metoda TIG kvůli elektrickému oblouku dosahuje vysoké energie na daleko větší plochu než laserový paprsek, který naopak umožňuje soustředit proud do jediného bodu. Dle toho vznikají tepelné deformace a typické zbarvení svarového spoje. Pro demonstraci rozdílu vneseného tepla bylo dle ČSN EN 1011-1 vybráno porovnání tepelného příkonu. Rovnice pro tepelný příkon je ve tvaru:[47]

$$Q = \eta \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.1)$$

kde:

$Q$  – tepelný příkon,  
 $\eta$  – účinnost procesu  
 $U$  – svařovací napětí [V],  
 $I$  – svařovací proud [I],  
 $v_s$  – svařovací rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Pro tepelný příkon pro metodu TIG byly použity hodnoty z experimentu této práce, které jsou znázorněny v tab. 28. Účinnost procesu pro svařování metodou TIG je v rozmezí 0,25 – 0,75, doporučená 0,4, tedy bylo zvoleno  $\eta = 0,4$ . Výpočet tepelného příkonu se vypočítá ze vztahu:[47]

$$Q_T = \eta \frac{U \cdot I}{v_{sT} \cdot 1000} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.2)$$

$$Q_T = 0,4 \cdot \frac{80 \cdot 10}{2 \cdot 1000} = 0,16 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tab. 28 Svařovací parametry pro metodu TIG

I [A]	U [V]	$v_{sT}$ – rychlost svařování pro TIG [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\eta$ – účinnost procesu
80	10	2	0,4

Pro tepelný příkon pro laserové svařování byly použity hodnoty z experimentu této práce, které jsou znázorněny v tab. 29. Účinnost procesu pro laserové svařování je v rozmezí 0,38 – 0,67, doporučená 0,5, tedy bylo zvoleno  $\eta = 0,5$ . Výpočet tepelného příkonu pro laserové svařování se vypočítá ze vztahu: [47]

$$Q_L = \eta \cdot \frac{P_{\text{svař}}}{v_{sL} \cdot 1000} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.3)$$

$$Q_L = 0,5 \cdot \frac{600}{15 \cdot 1000} = 0,02 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tab. 29 Svařovací podmínky pro laserové svařování.

$P_{\text{svař}}$ [W]	$v_{sL}$ – rychlost svařování pro laser [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\eta$ – účinnost procesu
600	15	0,5

## 4.2 Ekonomické zhodnocení

Pro ekonomické zhodnocení vybraných technologií bylo zvoleno porovnání nákladů na zhotovení svarového spoje. Pro jednodušší ukázkou se výpočet bude vztahovat na 1 kg odtaveného svarového kovu a na získání této hodnoty je potřeba znát i délky jednotlivých svarů a jejich velikosti. Toto hodnocení bude vypracováno na obě technologie svařování použité v experimentální části. Dalším kritériem vyhodnocení byl zvolen náklad na zaměstnance pro svaření 1 m svaru. Pro získání svařovacích parametrů pro výpočet byly použity hodnoty svařování z experimentální části a doplňující hodnoty ze vzorku TT5 a TL6. [47,48]

Pro zjištění nákladu na 1 kg odtaveného kovu je zapotřebí spočítat: [47,48]

- Náklady na operátora (mzdy, režijní náklady)
- Náklady na přídavný materiál
- Náklady na ochranné atmosféry

## 4.2.1 Náklady na svařování technologií laserového paprsku

### Náklady na operátora

Pro výpočet nákladů na operátora pro laserové svařování se počítá dle vztahu: [47,48]

$$N_{L1} = \frac{S_{SV}}{P_{GTA VL} \cdot t_{PRAC}} \text{ [Kč]} \quad (4.4)$$

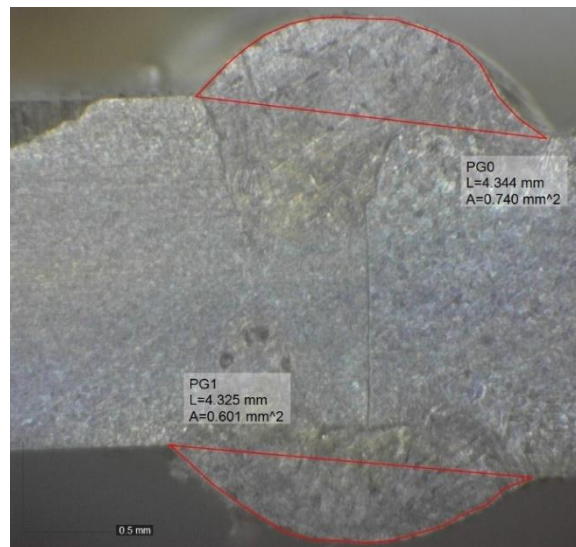
$$N_{L1} = \frac{500}{0,621324 \cdot 0,25} = 3218,93 \text{ Kč}$$

kde:  $S_{SV}$  – hodinová mzda svářečského dělníka [ $\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ ] (mzda se skládá z mzdových nákladů + odvod z mezd + režijní náklady, zvoleno  $500 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ ),

$t_{PRAC}$  – využití fondu pracovní doby pro svařování (pro ruční svařování 25 % - 30 %, zvoleno 25 %),

$P_{GTA VL}$  – výkon odtavení při svařování laserem [ $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ ].

Výkon odtavení se pro technologie svařování laserovým paprskem zjistí z množství odtaveného kovu na svarovém spoji. Pomocí výpočetního programu byla zjištěna plocha převýšení svarové housenky na vzorku, jako je vidět na Obr. 59, díky čemuž byl výkon následně vypočítán.



Obr. 62 Způsob měření plochy svaru.

Plochy průřezu svarů byly  $S_{L1} = 0,74 \text{ mm}^2$  a  $S_{L2} = 0,601 \text{ mm}^2$ , tyto hodnoty jsou následně použity pro výpočet množství odtaveného materiálu při svařování. Vzhledem k stejným délkám svarových housenek je možné tyto hodnoty sečíst pro celkovou hodnotu odtaveného materiálu. Při svařování laserovým paprskem se mezi svařovanými materiály teoreticky neuvažuje žádná mezera, která v reálné praxi vždy vznikne (např. nedokonalým připravováním nebo nepřesností uchycení základních materiálů) a proto se k sečtenému průřezu připočítává 10% přírůstek na možné vyplnění svarové mezery.

Výpočet průřezu převýšení  $S_L$  se vypočítá ze vztahu:

$$S_L = S_{L1} + S_{L2} + [(S_{L1} + S_{L2}) \cdot 0,1] \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.5)$$

$$S_L = 0,74 + 0,601 + [(0,74 + 0,604) \cdot 0,1] = 1,4751 \text{ mm}^2$$

kde:  $S_{L1}$  – průřez horního převýšení [ $\text{mm}^2$ ],  
 $S_{L2}$  – průřez spodního převýšení [ $\text{mm}^2$ ].

Výpočet objemu svarového převýšení  $V_L$  se vypočítá ze vztahu:

$$V_L = S_L \cdot l \text{ [cm}^3\text{]} \quad (4.6)$$

$$V_L = 1,4751 \cdot 150 = 221,265 \text{ mm}^3 \Rightarrow 0,221265 \text{ cm}^3$$

kde:  $l$  – délka svarového spoje [mm].

Výpočet hmotnosti svarového kovu  $Q_L$  se vypočítá ze vztahu:

$$Q_L = V_L \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (4.7)$$

$$Q_L = 0,221265 \cdot 7,8 = 1,7259 \text{ g} = 1,7259 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde:  $\rho$  – hustota svarového kovu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ].

Výpočet výkonu odtavení pro laserové svařování  $P_{\text{GTAVL}}$  se vypočítá ze vztahu:

$$P_{\text{GTAVL}} = \frac{Q_L}{t_L} = \frac{1,7259 \cdot 10^{-3}}{10} \text{ [kg} \cdot \text{hod}^{-1}\text{]} \quad (4.8)$$

$$P_{\text{GTAVL}} = \frac{1,7259 \cdot 10^{-3}}{10} = 1,7259 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,621324 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde:  $t_L$  – doba svaření vzorku ( $v_s$  = rychlost svařování  $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , délka svaru  $150 \text{ mm} \Rightarrow$  doba svaření je tedy  $10 \text{ s}$ ). [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

### Náklady na přídavný materiál

Výpočet nákladů na přídavný materiál pro laserové svařování se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_{L2} = \frac{C_{\text{PŘÍDL}}}{V_{\text{PŘÍD}}} = \frac{431,4}{0,098} = 440,2 \text{ [Kč} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (4.9)$$

kde:  $C_{\text{PŘÍDL}}$  – cena přídavného materiálu pro laser [ $\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] (prodejní cena je  $6471 \text{ Kč}$  (bez DPH) za  $15 \text{ kg}$  drátu  $\Rightarrow 431,4 \text{ Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

$V_{\text{PŘÍD}}$  – využití přídavného materiálu [%] (zvoleno  $98 \%$  pro eliminaci možných ztrát).

### Náklady na ochranný plyn

Výpočet nákladů na ochranný plyn pro laserové svařování se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_{L3} = \frac{Q_{\text{PLYN}} \cdot C_{\text{PLYN}}}{P_{\text{GTAVL}}} = \frac{720 \cdot 0,36}{0,621324} = 417,174 \text{ [Kč} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (4.10)$$

kde:  $Q_{\text{PLYN}}$  – průtočné množství ochranného plynu [ $\text{l}\cdot\text{hod}^{-1}$ ] (při experimentu byl nastaven průtok  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1} \Rightarrow 720 \text{ l}\cdot\text{hod}^{-1}$ ),

$C_{\text{PLYN}}$  – cena ochranného plynu [ $\text{Kč}\cdot\text{l}^{-1}$ ] (obsah lahve je  $50 \text{ l}$  a stojí  $3854 \text{ Kč}$  (bez DPH), která je naplněna stlačeným plynem o obsahu  $10700 \text{ l}$ , tedy  $1 \text{ l}$ itr stojí  $0,36 \text{ Kč}$ ),

$P_{\text{GTAVL}}$  – výkon odtavení při svařování laserem [ $\text{kg}\cdot\text{hod}^{-1}$ ].

### Celkové náklady na 1 kg odtaveného kovu pro laserové svařování

Výpočet celkových nákladů na 1 kg odtaveného kovu pro laserové svařování se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_L = N_{L1} + N_{L2} + N_{L3} \text{ [Kč]} \quad (4.11)$$

$$N_L = 3218,93 + 440,2 + 417,174 = 4076,304 \text{ Kč}$$

kde:  $N_{L1}$  – náklady na operátora,  
 $N_{L2}$  – náklady na přídavný materiál,  
 $N_{L3}$  – náklady na ochranný plyn.

Po sečtení všech dílčích mezi výpočtů vyšla cena nákladu na 1 kg odtaveného kovu pro metodu laserového paprsku, při svařovacích podmínkách použitých v experimentální části a aktuálních cenách ochranného plynu a přídavného materiálu na trhu, celkem 4076,304 Kč.

### 4.2.2 Náklady na svařování technologií TIG

#### Náklady na operátora

Výpočet nákladů na přídavný materiál pro metodu TIG se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_{T1} = \frac{S_{SV}}{P_{GTAVT} \cdot t_{PRAC}} \text{ [Kč]} \quad (4.12)$$

$$N_{T1} = \frac{500}{0,087552 \cdot 0,25} = 22\,843,56 \text{ Kč}$$

kde:  $S_{SV}$  – hodinová mzda svářečského dělníka [ $\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ ] (mzda se skládá z mzdových nákladů + odvod z mezd + režijní náklady, zvoleno  $500 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ ),  
 $t_{PRAC}$  – využití fondu pracovní doby pro svařování,  
 $P_{GTAVT}$  – výkon odtavení při svařování metodou TIG [ $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ ].

Pro zjištění hodnoty výkonu odtavení u metody TIG byl použit stejný postup jako u technologie laserového paprsku, kde  $S_{T1} = 0,699 \text{ mm}^2$  a  $S_{T2} = 0,718 \text{ mm}^2$ . K výslednému průřezu byl opět přičten přídavek na vyplnění mezery.

Výpočet průřezu převýšení  $S_T$  se vypočítá ze vztahu:

$$S_T = S_{T1} + S_{T2} + [(S_{T1} + S_{T2}) \cdot 0,1] \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.13)$$

$$S_T = 0,699 + 0,718 + [(0,699 + 0,718) \cdot 0,1] = 1,5587 \text{ mm}^2$$

kde:  $S_{T1}$  – průřez horního převýšení [ $\text{mm}^2$ ],  
 $S_{T2}$  – průřez spodního převýšení [ $\text{mm}^2$ ].

Výpočet objemu svarového převýšení  $V_T$  se vypočítá ze vztahu:

$$V_T = S_T \cdot l \text{ [cm}^3\text{]} \quad (4.14)$$

$$V_T = 1,5587 \cdot 150 = 233,805 \text{ mm}^3 \Rightarrow 0,233805 \text{ cm}^3$$

kde:  $l$  – délka svarového spoje [mm].

Výpočet hmotnosti svarového kovu  $Q_T$  se vypočítá ze vztahu:

$$Q_T = V_T \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (4.15)$$

$$Q_T = 0,233805 \cdot 7,8 = 1,824 \text{ g} = 1,824 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde:  $\rho$  – hustota svarového kovu [ $\text{g} \cdot \text{cm}^3$ ].

Výpočet výkonu odtavení pro metodu TIG  $P_{GTAVT}$  se vypočítá ze vztahu:

$$P_{GTAVT} = \frac{Q_T}{t_T} \text{ [kg} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (4.16)$$

$$P_{GTAVT} = \frac{1,824 \cdot 10^{-3}}{75} = 2,432 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,087552 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde:  $t_T$  – doba svaření vzorku metodou TIG ( $v_s$  = rychlost svařování  
2 mm·s<sup>-1</sup>, délka svaru 150 mm => doba svaření je tedy 75 s). [mm·s<sup>-1</sup>]

### Náklady na přídavný materiál

Výpočet nákladů na přídavný materiál pro metodu TIG se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_{T2} = \frac{C_{PŘIDT}}{V_{PŘID}} \text{ [Kč} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.17)$$

$$N_{T2} = \frac{558,6}{0,98} = 570 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:  $C_{PŘIDT}$  – cena přídavného materiálu pro TIG [Kč·kg<sup>-1</sup>] (cena 5kg balení svařovacího drátu je 2793 Kč (bez DPH), tedy 558,6 Kč·kg<sup>-1</sup>),  
 $V_{PŘID}$  – využití přídavného materiálu [%] (zvoleno 98 % pro eliminaci možných ztrát).

### Náklady na ochranný plyn

Výpočet nákladů na přídavný materiál pro metodu TIG se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_{T3} = \frac{Q_{PLYN} \cdot C_{PLYN}}{P_{GTAVT}} \text{ [Kč} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.18)$$

$$N_{T3} = \frac{720 \cdot 0,36}{0,087552} = 2960,53 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:  $Q_{PLYN}$  – průtočné množství ochranného plynu [l·hod<sup>-1</sup>] (při experimentu byl nastaven průtok 12 l·min<sup>-1</sup> => 720 l·hod<sup>-1</sup>),  
 $C_{PLYN}$  – cena ochranného plynu [Kč·l<sup>-1</sup>] (obsah lahve je 50 l a stojí 3854 Kč (cena bez DPH), která je naplněna stlačeným plynem o obsahu 10700 l, tedy 1 litr stojí 0,36 Kč),  
 $P_{GTAVT}$  – výkon odtavení při svařování metodou TIG [kg·hod<sup>-1</sup>].

### Celkové náklady na odtavení 1 kg odtaveného kovu pro TIG

Výpočet celkových nákladů na 1 kg odtaveného kovu pro metodu TIG se vypočítá ze vztahu: [47,48]

$$N_T = N_{T1} + N_{T2} + N_{T3} \text{ [Kč]} \quad (4.19)$$

$$N_T = 22843,56 + 570 + 417,174 = 23\,830,734 \text{ Kč}$$

kde:  $N_{T1}$  – náklady na operátora,  
 $N_{T2}$  – náklady na přídavný materiál,  
 $N_{T3}$  – náklady na ochranný plyn.

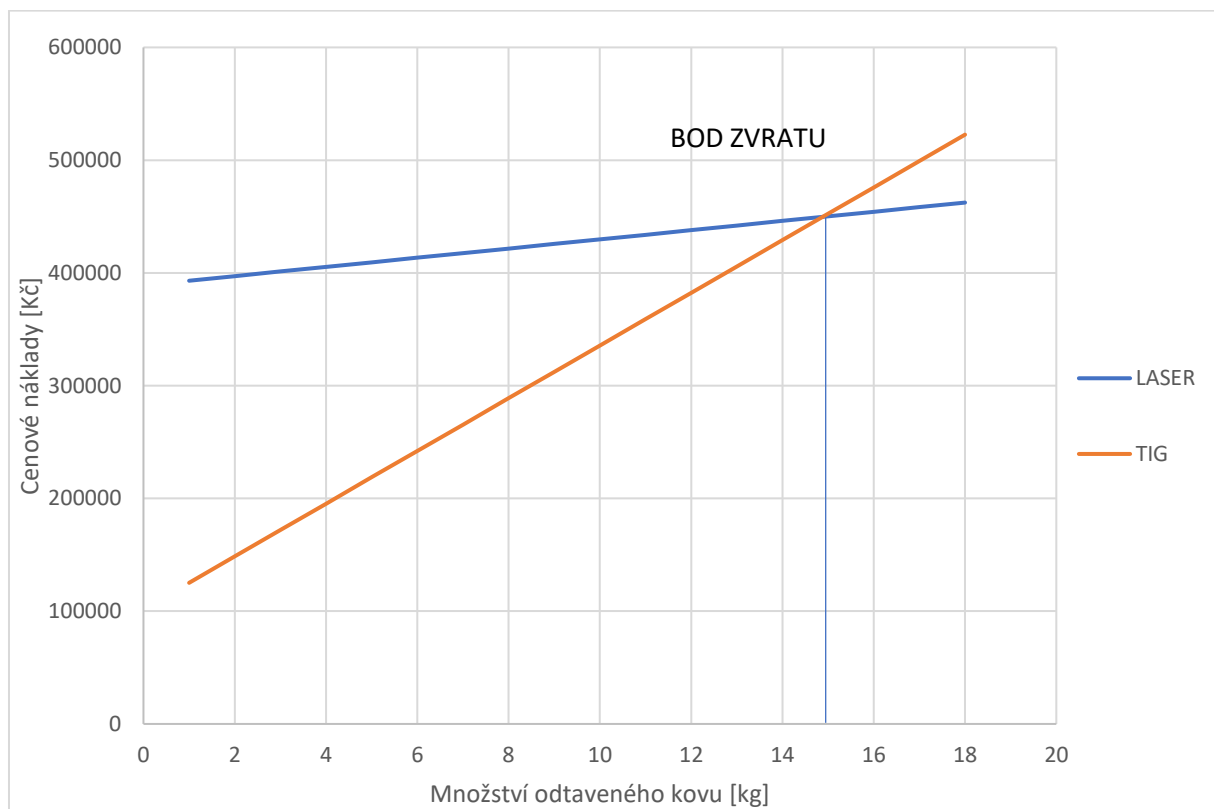
Po sečtení všech mezi výpočtů vyšla cena nákladu na 1 kg odtaveného kovu pro metodu TIG, při svařovacích podmínkách použitých v experimentální části a aktuálních cenách ochranného plynu a přídavného materiálu na trhu, celkem 23 380,734 Kč.

### 4.2.3 Souhrn nákladů a návratnost investice

Laserové svařování a jeho zařízení je poměrně drahým zařízením z hlediska počátečních investic, které ale přináší řadu výhod. Oproti konvenční metodě TIG, má vyšší rychlost svařování, která s sebou nese vysoké úspory ze strany nákladů na svařování. Dle výpočtů pro zjištění nákladu na 1 kg odtaveného kovu, kde výsledky jsou shrnuty v tab. 30, vyšel několikanásobný rozdíl již v nákladech na operátora nebo ochranného plynu. Avšak jak již bylo zmíněno, s celkovými pořizovacími náklady je laserový paprsek mnohem dražší než TIG. Při zanesení získaných hodnot a počátečních investic se zjistilo, dle graf 7, že k návratnosti laserového zařízení dojde po odtavení 14,848 kg kovu (tj. při dosažení celkových nákladů ve výši 449 647,191 Kč), při svařovacích podmínkách uvažovaných v praktické části a aktuálních cenách zařízení a ostatních nákladů ke dni 25.5.2023.

Tab. 30 Výsledné hodnoty ekonomického zhodnocení

	Laserový paprsek	Metoda TIG
Náklady na operátora [Kč]	3218,93	22 843,56
Náklady na přídatný materiál [Kč]	440,2	570
Náklady na ochranný plyn [Kč]	417,174	2960,53
$\Sigma$ nákladů na 1kg odtaveného kovu [Kč]	4076,304	23 380,734
Pořizovací cena (bez DPH) [Kč]	389 000	101 785



Graf 7 Návratnost laserového zařízení

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na přímé porovnání konvenční metody ručního svařování TIG a ručního laserového svařování, které se již postupně začíná implementovat do výrobních podniků. Součástí teoretické části byla literární rešerše zabývající se problematikou svařování jednotlivými metodami, svařitelností s rozdělením korozivzdorných ocelí a popisem vad svarových spojů.

Cílem praktické části bylo svaření vzorků plechů z korozivzdorné austenitické oceli o tloušťce 2 mm ze standardního a leštěného povrchu pro firmu XY. Pro svařování byly zvoleny tupé a koutové svary a přeplátované s koutovým svarem. Svařování probíhalo se stejnými podmínkami (ochran. plyn, příd. drát) pro obě technologie. Následně byly tyto svary podrobeny vizuální a makroskopické kontrole, tahové zkoušce a zkouškám tvrdosti. V další části bylo provedeno technické hodnocení svarů, zkoušek a výpočet tepelného příkonu na jednotku délky. Součástí je ekonomické vyhodnocení s výpočtem návratnosti laserového zařízení z hlediska odtaveného svarového kovu.

Po vizuální kontrole všechny vzorky s tupým, koutovým i přeplátovaným typem svaru připravené metodou TIG nevykazovaly žádnou povrchovou vadu. Svary mají výrazně viditelnou TOO. Svarové spoje byly z vizuálního pohledu hodnoceny jako vyhovující. Svary vytvořené laserovým paprskem byly z hlediska vizuální kontroly také bez povrchových vad s minimální TOO. Na vzorku z leštěného plechu (vzorek KL3) s koutovým svarem došlo ke špatnému navedení svařovací pistole, kvůli čemuž došlo k částečnému neprovaření základních materiálů. Tato vada poukazuje na složitost vedení svařovací pistole laserového paprsku, kde není možné mít plnou kontrolu nad svarovým spojem, jako je například při svařování metodou TIG. Zbytek svarových spojů byl bez vizuálních vad a byly hodnoceny jako vyhovující. Při makroskopických zkouškách byly zkoumány tupé a koutové typy svarů. Vzorky svařené metodou TIG (vzorek TT5 a KT1) byly vyhodnoceny jako plně vyhovující z hlediska dostatečné hloubky průvaru (tupý svar – průvar 1,608 mm, koutový svar – průvar 1,603 mm) a natavení základních materiálů u všech typů svarů. Při kontrole vzorků svařených laserovým paprskem byla objevena řada vnitřních vad. Tupý svar (vzorek TL6) neměl dostatečný průvar a došlo ke spojení nataveným přídavným materiálem. Druhou vadou bylo přesazení základních materiálů vlivem svařování pomocí vodící lišty. U koutového svaru (vzorek KL2) došlo ke studenému spoji a neprovařenému kořenu. Tyto vady byly na obou stranách svarového spoje. Tupé a koutové svary z laserového svařování jsou dle množství chyb nevyhovující. Pro tahové zkoušky byly připraveny od každého vzorku (TT5, TL6, PT3 a PT4) 3 ks zkušebních těles. Při tahových zkouškách bylo u tupých a přeplátovaných spojů připravených metodou TIG dosaženo přetržení vždy v základním materiálu mimo TOO, kde byla naměřena hodnota meze pevnosti 710, 727 a 725 MPa u tupých a u přeplátovaných spojů 632, 644 a 649 MPa. Dle výsledků je možné vyhodnotit svary jako vyhovující s dostatečnými pevnostními vlastnostmi. U všech tupých spojů z laserového paprsku došlo k přetržení v místě svarového spoje. Nejvyšší hodnota meze pevnosti byla 532 a 531 MPa. U všech přeplátovaných spojů došlo k porušení v základním materiálu, mez pevnosti dosáhla hodnoty 619, 624 a 630 MPa. Tupé svary jsou vzhledem k výsledkům nevyhovující, naopak přeplátované svary dosáhly téměř stejných hodnot jako u technologie TIG. Pro zjištění vlivu změny pevnosti svaru při svařování leštěného plechu (TL7) vzorky dosáhly přetržení také ve svarovém spoji. Nejvyšší hodnota meze pevnosti byla 458, 449 a 396 MPa. Díky výsledkům byla potvrzena ztráta svařovacího výkonu při svařování plechů s leštěným povrchem. Po tahových zkouškách byla zjištěna další vnitřní vada u tupých spojů v podobě řady a shluku pórů, které vznikly při svařování vlivem vzduchové kapsy mezi svařovanými materiály. Zkoušky tvrdosti byly provedeny na tupých svarech dle metody ČSN EN ISO 9015-1. U tupého svaru metodou TIG (vzorek TT5) byl zaznamenán pokles tvrdosti směrem od základního materiálu (201 HV5) ke svarovému kovu (173 HV5) s mírnou změnou tvrdosti v TOO. U druhého vzorku

z laserového svařování (vzorek TL6) byl změřen plynulý pokles tvrdosti s blížícím se svarovým spojem (178 HV5) od základního materiálu (201 HV5), tento spoj má minimální TOO, a proto nebyl zaznamenán žádný výkyv tvrdosti.

Dle získaných výsledků z destruktivních a nedestruktivních zkoušek lze vyvodit správné nastavení svařovacích parametrů pro metodu TIG, která prokázala jakostní svary s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Technologie svařování pomocí ručního vedení laserového paprsku s přídavným materiálem dle vizuální kontroly nejevila známky vad, avšak dle dalších zkoušek byla zjištěna řada vad, která způsobila naprosto nevyhovující kvalitu svarových spojů, kvůli špatně nastaveným parametrům pro svařování tohoto typu materiálu.

Ekonomické zhodnocení bylo vyjádřeno na příkladu nákladu na svařování 1 kg odtaveného kovu. Celkové náklady byly spočítány pro obě technologie za použití svařovacích parametrů použitých v praktické části. Při těchto parametrech došlo, i přes násobně vyšší počáteční investici do laserového svařovacího zdroje oproti zařízení TIG, k bodu zvratu po 14,878 kg odtaveného kovu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK, 2000. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [2] *ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering*, 2003. 6th print. Materials Park: ASM International, xvi, 1299 s. : il, čb. fot. ISBN 0-87170-382-3.
- [3] MESSLER, Robert W, 1999. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley, 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
- [4] STEEN, William M, 1998. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
- [5] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro mezinárodní/eurospké svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*, 2016. Brno: Odbor svařování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 272 stran : ilustrace.
- [6] *Materiály a jejich chování při svařování: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*, 2016. Česká svářečská společnost ANB: Český svářečský ústav, 404 stran 155
- [7] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK, 2001. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 395 s. 155 il. ISBN 80-85771-81-0.
- [8] BEZÁK, Ján, Anton KOLENO, Ivan VITÁLOŠ, et al., 2011. *Zváracie procesy a zariadenia: učebný text pre vyšší zvaračský personál*. Bratislava: Prvá zvaračská , a.s, 287 stran : ilustrace. ISBN 978-80-89421-01-5.
- [9] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. In: . s. 22 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_mrna.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf)
- [10] MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. In: . s. 32 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf)
- [11] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II, část svařování - 2: Syllabus přednášek* [online]. In: . s. 155 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_techologie\\_II\\_opora\\_svarovani\\_2018\\_II\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_techologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf)
- [12] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ* [online]. In: . s. 42 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie\\_svarovani\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf)
- [13] Zajímavosti o sváření - Historie. *ELEKTRODY.CZ* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.elektrody.cz/zajimavosti-o-svareni-historie>
- [14] Vše o sváření a svařování. *Svářecí kukla.cz* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/blog/svarovani-svareni-vse-o-svareni/>

- 
- [15] BROŽ, Ondřej. Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu WIG (TIG) - 141. *DOCPLAYER* [online]. 2016 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10485186-Obloukove-svarovani-wolframovou-elektrodou-v-inertnim-plynu-wig-tig-141.html>
- [16] Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. *Konstrukce.: Odborné časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2014 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
- [17] CUNAT, Pierra-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí: Materiály a jejich použití, Volume 3* [online]. In: . s. 39 [cit. 2023-05-11]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_CZ.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf)
- [18] VOJTA, Filip, 2003. *Princip laseru* [online]. České Budějovice [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://old.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>. Seminární práce. Jihočeská Univerzita České Budějovice.
- [19] KOŘÁN, Pavel, 2014. Využití laseru v průmyslu - minulost a současnost. *LAO - průmyslové systémy* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyuziti-laseru-v-prumyslu--minulost-a-soucasnost-313>
- [20] *Nekonvenční metody svařování - laser* [online], 2016. Praha [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2962761-1-nekonvencni-metody-svarovani-laser-2-svarovani-laserem-51.html>
- [21] Laserové svařování, 2020. In: *Laser therm* [online]. 2019: laser therm [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-Navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [22] Ruční laserová svářečka, 2020. In: *Laser therm* [online]. Praha: Laser therm, 2020 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/produkty/rucni-laserova-svarecka>
- [23] HERNANDO, Iñigo, Jon Iñaki ARRIZUBIETA, Aitzol LAMIKIZ a Eneko UKAR. *Laser beam welding analytical model when using wobble strategy: International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. In: . 2020, s. 149 [cit. 2023-05-23]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119248>
- [24] MRŇA, Libor, 1997. Pokročilé metody laserového svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2017 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani>
- [25] MRŇA, Libor, 1997. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2018 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani>
-

- 
- [26] Wobble welding advantages and benefits. *Laser wobble welding* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.laserwobblewelding.com/cs/wobble-laserwelding-the-welding-revolution/advantages-of-wobble-laser-welding>
- [27] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu, 2011. *Megablog* [online]. Praha: MEGAFLEX, spol. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.megablog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [28] SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU, 1997. *LAO - průmyslové systémy* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [29] Rozdělení laserů, 2020. *LASCAM: Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu* [online]. Praha: LASCAM systems [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [30] MRŇA, Libor, 2022. *Zborník prednášok z konferencie Kvalita vo zváraní 2022*. Výskumný ústav zvaračský. Bratislava.
- [31] MINAŘÍK, Václav, 2006. Technologické lasery: Základní druhy technologických laserů pro řezání a svařování. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha: CWS ANB, 2007 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
- [32] PETERKA, Pavel, Pavel HONZÁTKO a Ivan KAŠÍK, 1951. Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu. *Česko slovenský časopis pro fyziku* [online]. 2015, 2015(5), 6 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/144877685-Vlaknove-lasery-novy-nastroj-pro-prumysl-a-medicinu.html>
- [33] Laserové svařování vs. tradiční svařování, 2006. *ESAB* [online]. Praha: ESAB [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://esab.com/cz/eur\\_cs/esab-university/articles/laser-welding-vs-traditional-welding/](https://esab.com/cz/eur_cs/esab-university/articles/laser-welding-vs-traditional-welding/)
- [34] HERRMANN, Johann, 2011. The role of process gases in laser welding: Laser welding requires process gases in order to obtain stable and high quality welds. *Laser technik journal* [online]. 2011, 2011(8), 4 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1002/latj.201190054>
- [35] Vady ve svarech, 2010. *Elektrody: Svařovací technika skladem a za skvělé ceny* [online]. Praha: Elektrody [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.elektrody.cz/vady-ve-svarech>
- [36] HALLA, Petr, 2002. Vady při svařování a tepelném dělení. *Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. Ostrava – Zábřeh: KONSTRUKCE Media, 2019 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/vady-pri-svarovani-a-tepelnem-deleni-265>
- [37] BARTÁK, Jiří, 2006. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha: ANB, 2012 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [38] Welding Defects : Types, Causes, Testing and Remedies. *Mech4study: Mechanical Engineering Blog* [online]. Astra WordPress Theme [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/production-engineering/welding-defects-types-causes-testing-and-remedies.html/>
-

- 
- [39] *The Avesta Welding Manual: Practice and products for stainless steel welding* [online], 2004. Švédsko: Avesta Welding AB 2004 [cit. 2023-05-23]. ISBN 91-631-5713-6. Dostupné z: [https://www.academia.edu/8277786/Avesta\\_Welding\\_AB\\_AVESTA\\_WELDING\\_MANUAL\\_Practice\\_and\\_products\\_for\\_stainless\\_steel\\_welding\\_The\\_AVESTA\\_WELDING\\_MANUAL](https://www.academia.edu/8277786/Avesta_Welding_AB_AVESTA_WELDING_MANUAL_Practice_and_products_for_stainless_steel_welding_The_AVESTA_WELDING_MANUAL)
- [40] *Technická příručka: Svařování nerezavějících ocelí*, 2009. Vamberk.
- [41] KUDĚLKA, Vladimír, Zdeněk BALEJ, Jan OPLETAL, Martin MYŠÁK a Naděžda VLHOVÁ, 2014. Korozivzdorné oceli, vlastnosti a rozdělení. *Česká svařečská společnost ANB* [online]. Praha: ANB [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [http://www.cws-anb.cz/docu/texty/0000/000032\\_121-korozivzdorne-oceli-1.pdf](http://www.cws-anb.cz/docu/texty/0000/000032_121-korozivzdorne-oceli-1.pdf)
- [42] Vysokolegované korozivzdorné oceli, 2014. *Studijní opory – slévárenství* [online]. Brno: VUT FSI [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2\\_10\\_2.html](http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_10_2.html)
- [43] *New Frontiers of Laser Welding Technology*, 2023. In: *FAIST Ltd. Holdings* [online]. United Kingdom: FAIST Ltd. Holdings, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.faistgroup.com/news/new-frontiers-of-laser-welding-technology/>
- [44] *Care And Maintenance Of Stainless Steel Sculpture*, 2009–2023. In: *ARCHISCENE* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.archiscene.net/art/care-and-maintenance-of-stainless-steel-sculpture/>
- [45] Svařování TIG. In: *Zámečnictví BENC* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.zamecnictvi-benc.cz/svarovani-tig>
- [46] Použití nerezových trubek a lisovacích fitinků z nerezové oceli AISI 316L ve slaném (mořském) prostředí/ mořském aerosolu. In: *Topenářiství instalace* [online]. Praha, 2021 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/pouziti-nerezovych-trubek-a-lisovacich-fitinku-z-nerezove-oceli-aisi-316l-ve-slanem-morskem-prostredi-morskeho-aerosolu-detail-10504>
- [47] OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I* [online]. VŠB TU Ostrava, 2011 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: [https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv\\_tep\\_l\\_rezimu\\_a1.pdf](https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tep_l_rezimu_a1.pdf)
- [48] NOVÁK, Stanislav a Jiří MRÁČEK. *PARAMETRY, KTERÉ OVLIVŇUJÍ NÁKLADY NA SVAŘOVÁNÍ* [online]. PRVNÍ ŽELEZÁŘSKÁ SPOLEČNOST KLADNO, s. r. o. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: [http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/Zelezarenska\\_KLadno.pdf](http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/Zelezarenska_KLadno.pdf)
- [49] *Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním: ČSN EN ISO 5817*, 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 36 s. ICS 25.160.40.
- [50] ČSN EN ISO 6520-1, 2008. *Svařování a příbuzné procesy - klasifikace geometrických vad kovových materiálů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 68 s. ICS 25.160.40.
-

- [51] ČSN EN ISO 4063, 2011. *Svařování a příbuzné procesy - přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. ICS 25.160.01.
- [52] ČSN EN ISO 9015-1, 2011. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - zkoušení tvrdosti: Část 1: zkoušená tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
$v_s$	rychlost svařování	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
T	stupeň celsia	$[^\circ\text{C}]$
I	svařovací proud	[A]
U	svařovací napětí	[V]
E	energetický rozdíl mezi hladinami	[J]
h	planckova konstanta	[J.s]
$\nu$	frekvence vyzářeného atomu	[Hz]
$C_{\text{ekvivalent}}$	chromový ekvivalent	[%]
$N_{\text{ekvivalent}}$	niklový ekvivalent	[%]
R <sub>m</sub>	mez pevnost	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	mez kluzu	[MPa]
HV5	hodnota tvrdosti	[HV5]
Q	tepelný příkon	$[\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$
$\eta$	účinnost procesu	[-]
$P_{\text{svař}}$	svařovací výkon laseru	[W]
$v_{sl}$	svařovací rychlost laseru	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_{st}$	svařovací rychlost pro TIG	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
S <sub>SV</sub>	hodinová mzda svářecího dělníka	$[\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}]$
t <sub>PRAC</sub>	využití fondu pracovní doby pro svařování	[%]
P <sub>GTAVL</sub>	výkon odtavení při svařování laserem	$[\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$
P <sub>GTAVT</sub>	výkon odtavení při svařování metodou TIG	$[\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$
S <sub>L1</sub>	průřez horního převýšení	$[\text{mm}^2]$
S <sub>L2</sub>	průřez spodního převýšení	$[\text{mm}^2]$
S <sub>T1</sub>	průřez horního převýšení	$[\text{mm}^2]$
S <sub>T2</sub>	průřez spodního převýšení	$[\text{mm}^2]$
l	délka svarového spoje	[mm]
$\rho$	hustota svarového kovu	$[\text{g} \cdot \text{cm}^3]$
t <sub>L</sub>	doba svaření vzorku laserem	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
t <sub>T</sub>	doba svaření vzorku metodou TIG	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
C <sub>PŘÍDL</sub>	cena přídavného materiálu pro laser	$[\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}]$
C <sub>PŘÍDT</sub>	cena přídavného materiálu pro TIG	$[\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}]$
V <sub>PŘÍD</sub>	využití přídavného materiálu	[%]
Q <sub>PLYN</sub>	průtočné množství ochranného plynu	$[\text{l} \cdot \text{hod}^{-1}]$
C <sub>PLYN</sub>	cena ochranného plynu	$[\text{Kč} \cdot \text{l}^{-1}]$
N <sub>L1</sub>	náklady na operátora	[Kč]
N <sub>T1</sub>	náklady na operátora	[Kč]
N <sub>L2</sub>	náklady na přídavný materiál	[Kč]
N <sub>T2</sub>	náklady na přídavný materiál	[Kč]
N <sub>L3</sub>	náklady na ochranný plyn	[Kč]
N <sub>T3</sub>	náklady na ochranný plyn	[Kč]

---

**Zkratky**

Označení	Legenda
TIG	Tungsten inert gas
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal anert gas
MMA	Manual metal arc welding
TOO	Teplotně ovlivněná oblast
ppm	particels per milino
LPSS	lamp pumped solid state
DPSS	diode pumped solid state

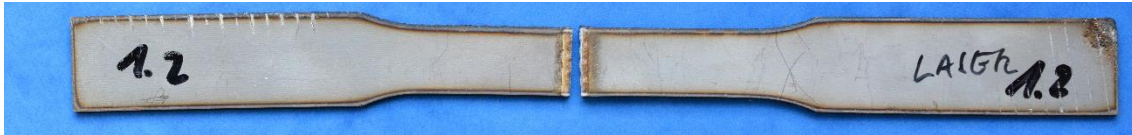
---

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č.1	Vzorek 1.2
Příloha č.2	Vzorek 1.3
Příloha č.3	Vzorek 1.5
Příloha č.4	Vzorek 1.6
Příloha č.5	Vzorek 2.5
Příloha č.6	Vzorek 2.6
Příloha č.7	Vzorek 1.8
Příloha č.8	Vzorek 1.9
Příloha č.9	Vzorek 2.1
Příloha č.10	Vzorek 2.2
Příloha č.11	Vzorek 2.3
Příloha č.12	Materiálový ATEST
Příloha č.13	Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN

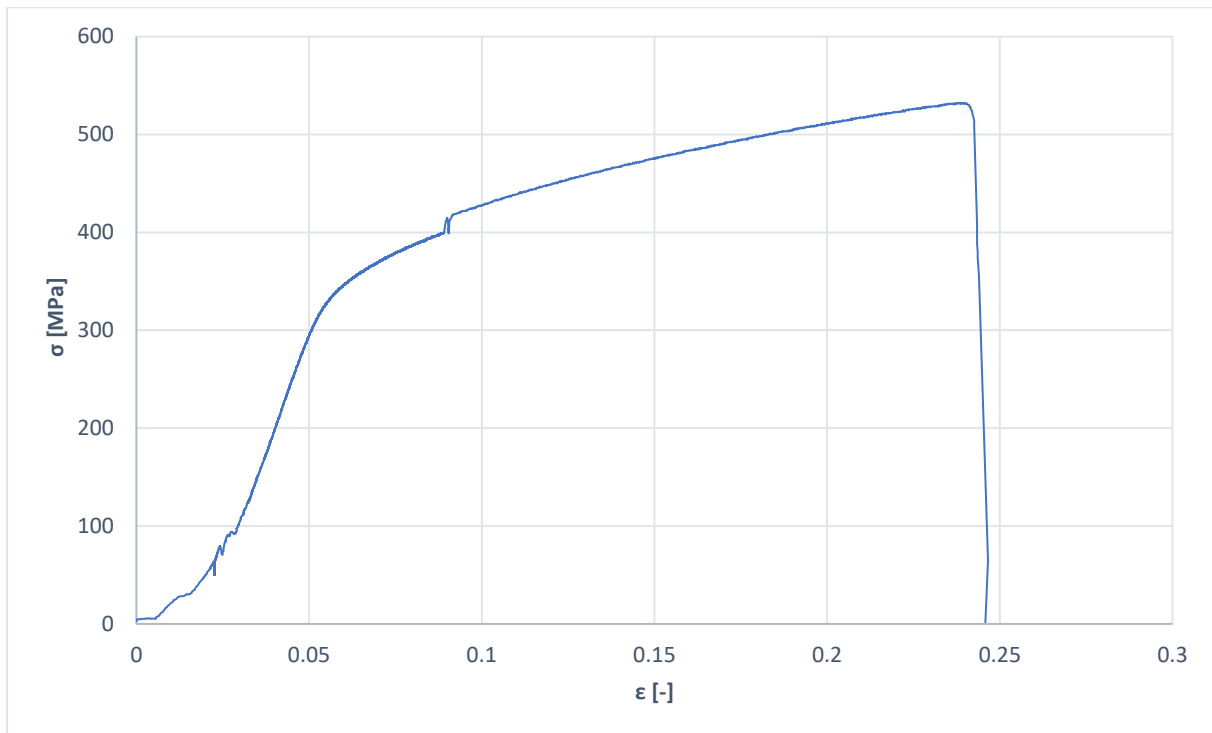
**Vzorek 1.2**

Naneštěstí se u vzorku 1.2 exportem dat ztratily výsledky a není tedy záznam o průběhu zkoušky, ani výsledné hodnoty. Vzorek dosáhl přetržení také ve svarové spoji, tedy lze odvodit podobné mechanické hodnoty jako u vzorku 1.1 a 1.3.



Obr. 63 Vzorek 1.2 po tahové zkoušce.

## Vzorek 1.3



Graf 8 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.3.

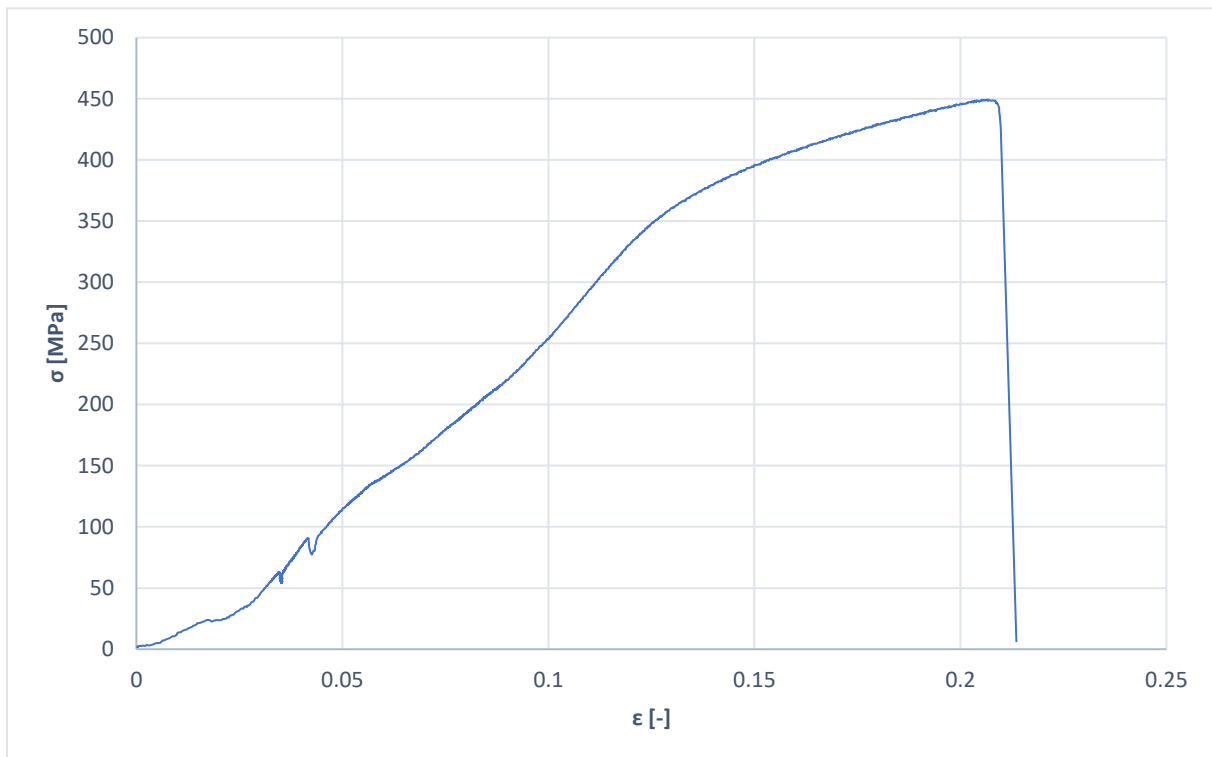
Tab.31 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.3.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
321	532	13	50	1,93	13,887	26,77



Obr. 64 Vzorek 1.3 po tahové zkoušce.

## Vzorek 1.5



Graf 9 Průběh zkoušky pro vzorek 1.5.

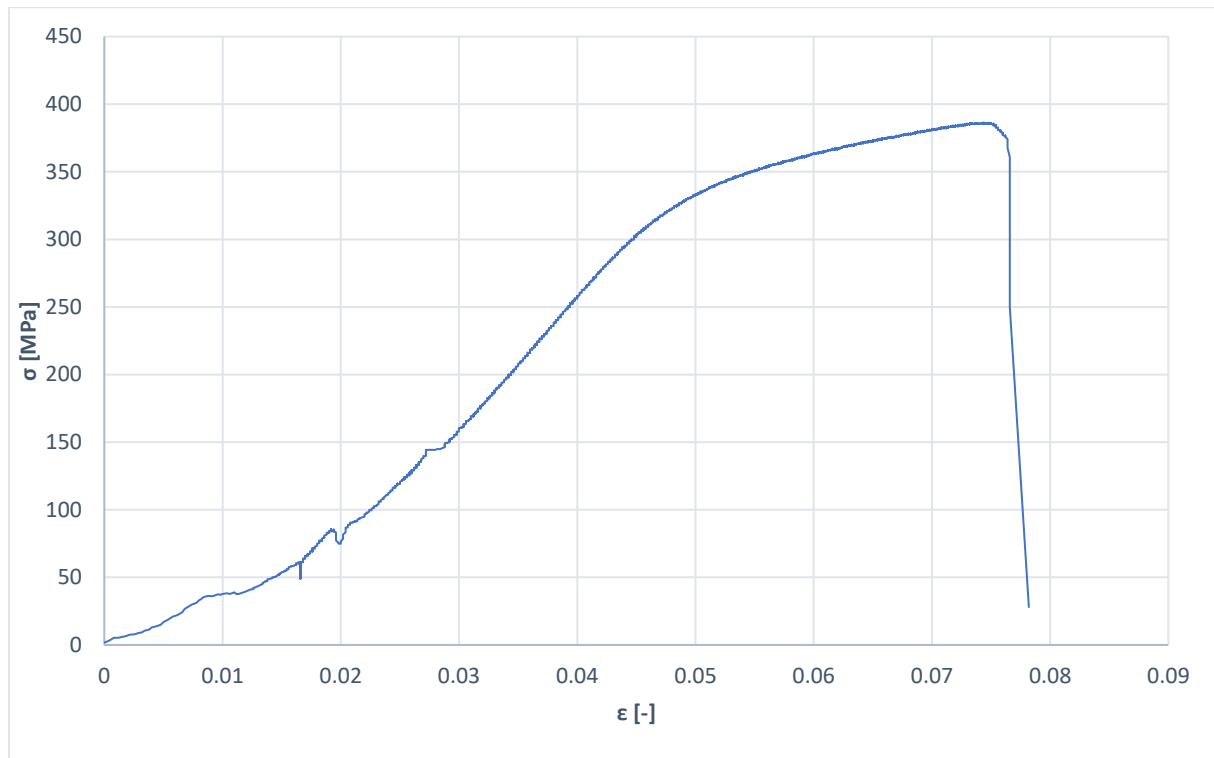
Tab. 32 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.5.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
136	449	8	50	1,89	14,47	27,35



Obr. 65 Vzorek 1.5 po tahové zkoušce.

## Vzorek 1.6



Graf 10 průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.6.

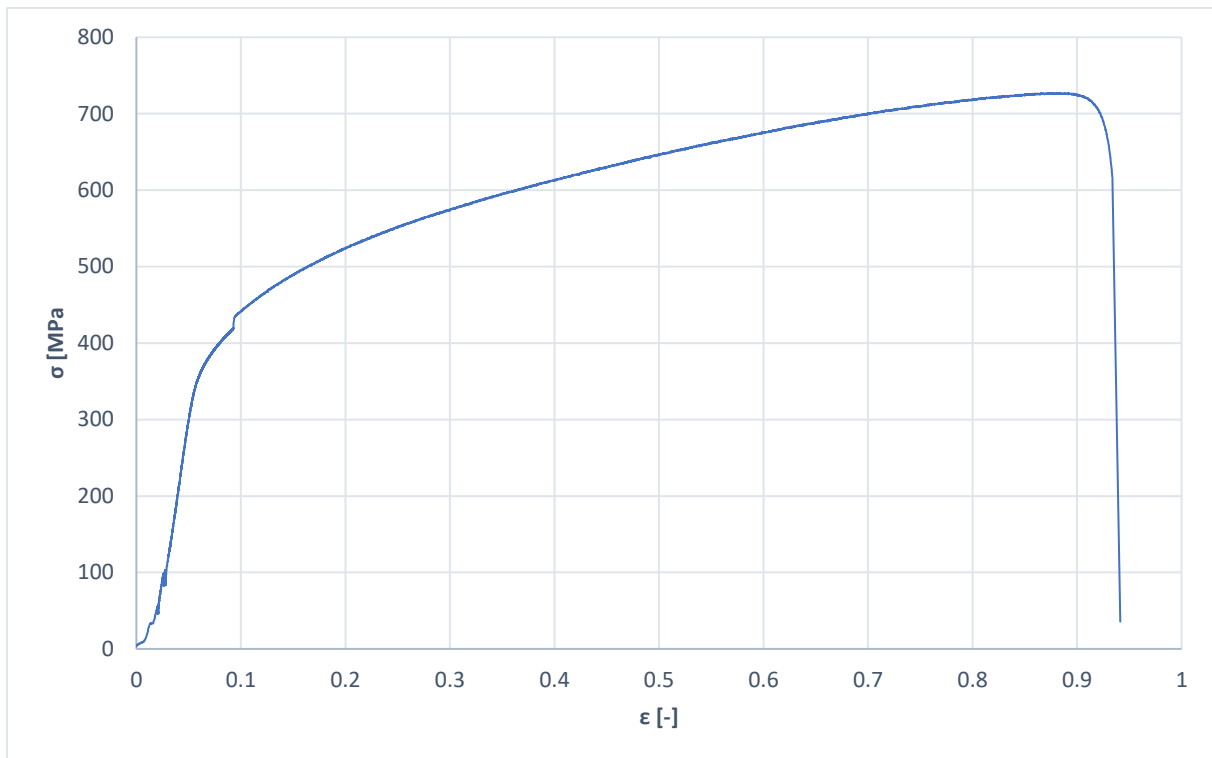
Tab. 33 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.6.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
333	396	8	50	1,89	14,34	27,1026



Obr. 66 Vzorek 1.6 po tahové zkoušce.

## Vzorek 2.5



Graf 11 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.5.

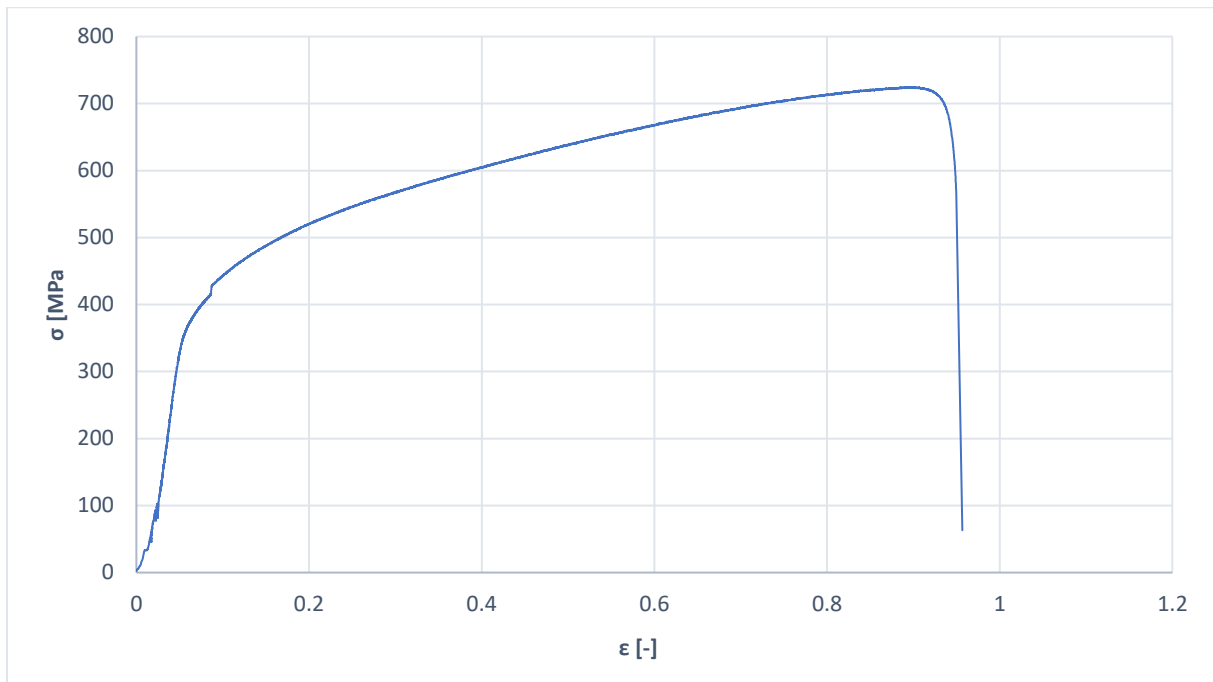
Tab. 34 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 2.5.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
421	727	50	50	1,88	14,39	27,05



Obr. 67 Vzorek 2.5 po tahové zkoušce.

## Vzorek 2.6



Graf 12 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.6.

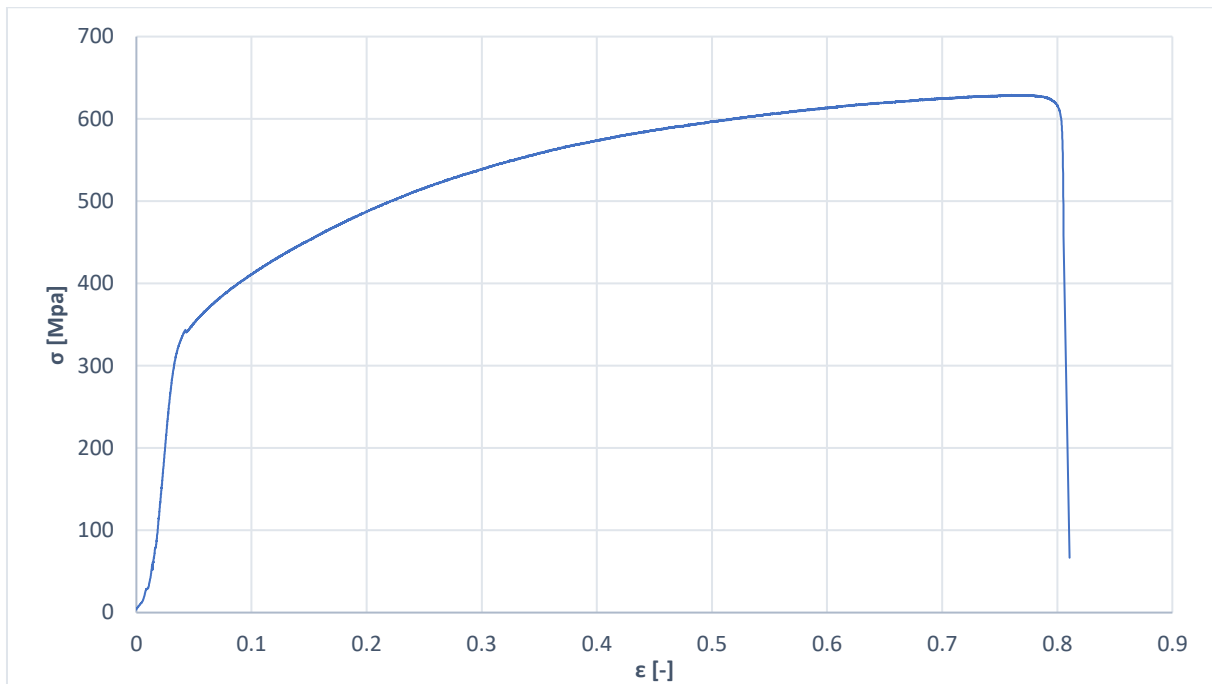
Tab. 35 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 2.6

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
428	725	46	50	1,91	14,52	27,73



Obr. 68 Vzorek 2.6 po tahové zkoušce.

## Vzorek 1.8



Graf 13 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.8.

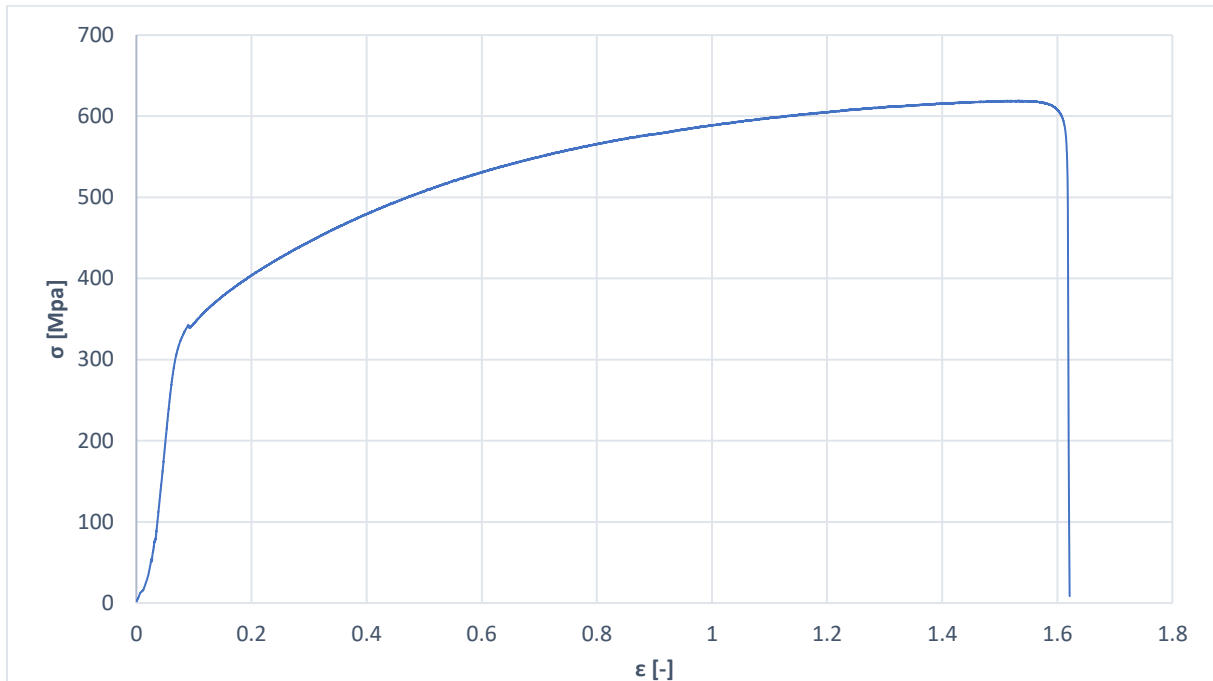
Tab. 36 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.8.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Lo	a [mm]	b [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]
354	630	37	100	1,96	20,28	39,85



Obr. 69 Vzorek 1.8 po tahové zkoušce.

## Vzorek 1.9



Graf 14 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 1.9.

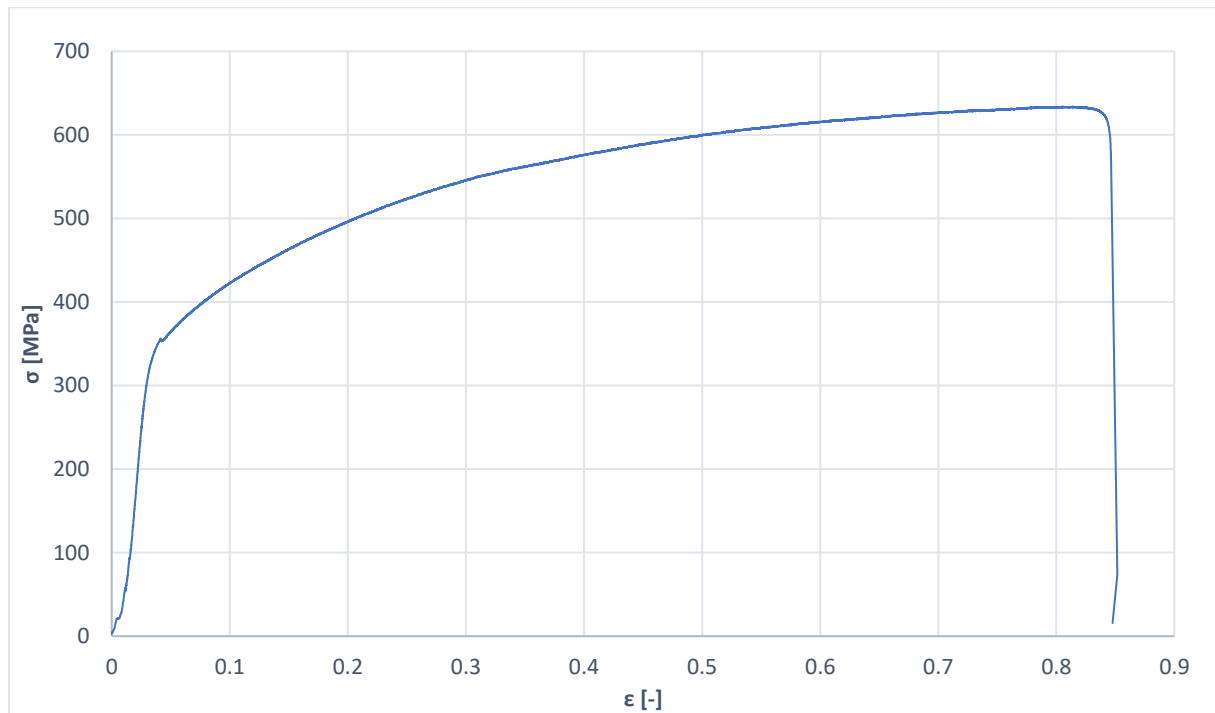
Tab. 37 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 1.9.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
350	619	39	100	3,96	20,22	39,73



Obr. 70 Vzorek 1.9 po tahové zkoušce.

## Vzorek 2.1



Graf 15 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.1.

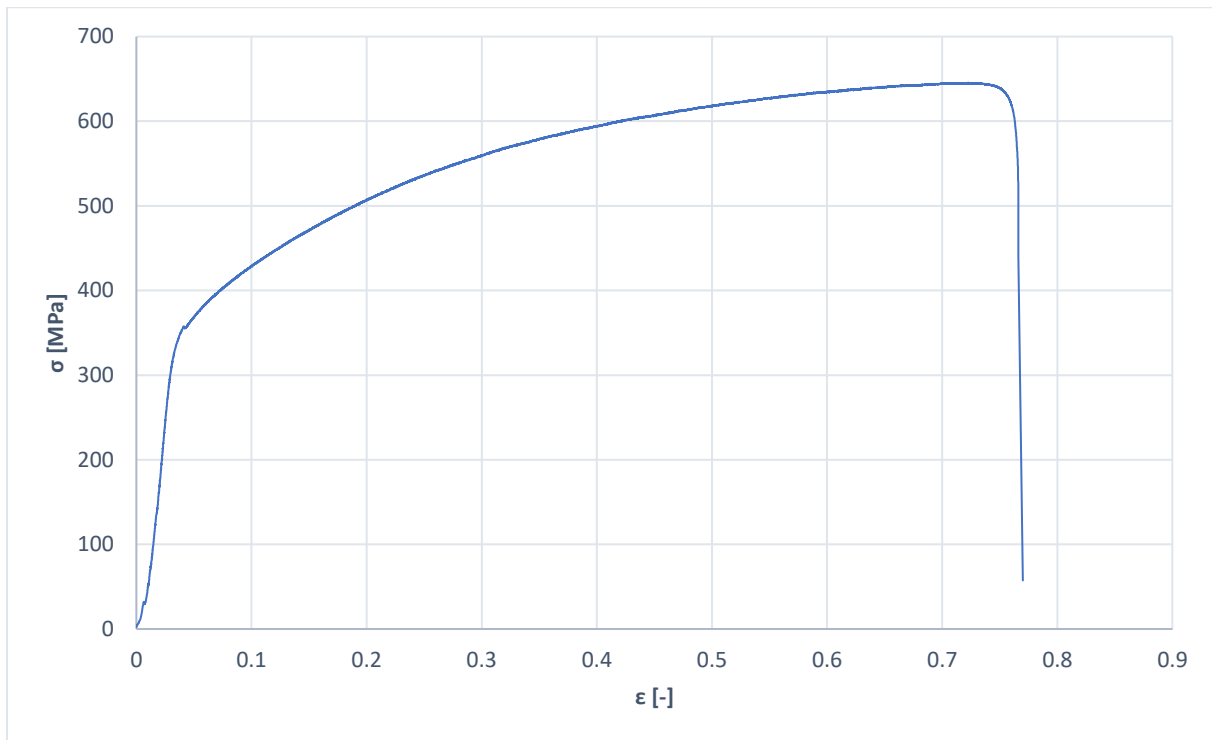
Tab. 38 Výsledné hodnoty pro vzorek 2.1.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
364	632	34	100	1,96	19,85	39



Obr. 71 Vzorek 2.1 po tahové zkoušce.

## Vzorek 2.2



Graf 16 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.2.

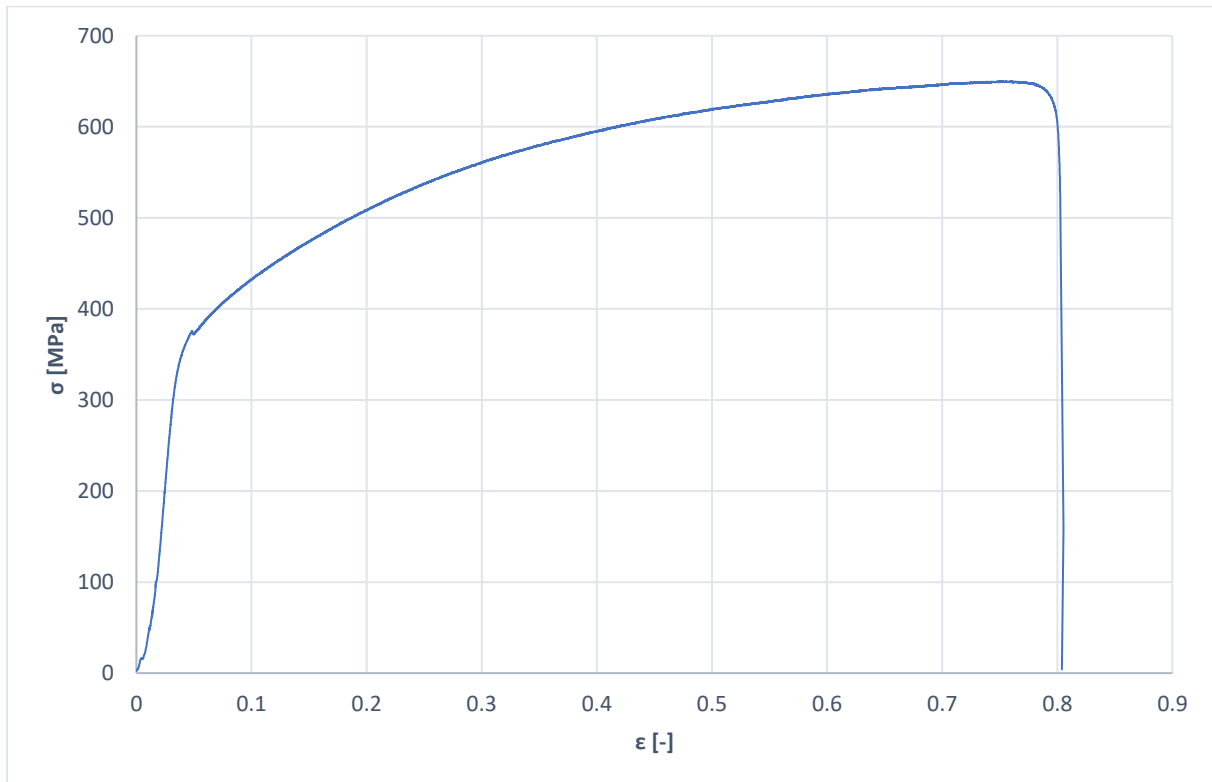
Tab. 39 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 2.2.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
365	644	35	100	1,96	18,34	36



Obr. 72 Vzorek 2.2 po tahové zkoušce.

## Vzorek 2.3



Graf 17 Průběh tahové zkoušky pro vzorek 2.3.


Tab. 40 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek 2.3.

Re/Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	L <sub>0</sub>	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
377	649	35	100	1,96	21,02	41,03



Obr. 73 Vzorek 2.3 po tahové zkoušce.

Příloha č.12  
Materiálový Atest

		Type		Inspection Certificate 3.1 A2-2000 EN-10204		Number		10723205670		Issued On		22/03/2023	
		Customer ITALINOX S.R.O. ZDEBRADSKA 58/59 251 01 RÍČANÝ - JAZLOVICE CZ		Consignee ITALINOX S.R.O. ZDEBRADSKA 58/59 251 01 RÍČANÝ - JAZLOVICE CZ		Delivery No 01		Quality Control Q.M.D./M. A. Ventrari Plant Or Gasordo		Pages 1/1			
Material S0601574 Description CXF02C 2,00 x 1250 4307/304L SR 6/15 FINITURA -2B*		Norm/Grade EN10028-2/EN10088-2/EN10088-4, ASTM A240, ASME SA240, ASTM A480, ASMESA480		Quality/Qualità X2CN18-9, WN1.4307, 304L, X5CN18-10, 1.4301, 304		Delivery Note nr 1007003273		Order N° 1191544733/40		Client Order 2022-QIM-949			
Item 1 23EM001408 2 23EM001409		Heat Y220418D55-4 Y220418D55-4		Quantity 10120 KG 10090 KG		Dimensional tolerances/ EN1045-2		Steel Processing/ Electric arc furnace VOD/AOD, continuous casting, heat treatment/annealing at 1050°C, forced air cooling		Mark Tester/ - Organization Inspection: C03		Terms of Delivery/ - ASME norms acc. Sec. II Part A Ed. 2021	
Identification Nr 23EM001408 23EM001409		Chemical Type Mark 23RF011772 23RF011772		C (%) SI (%) Mn (%) P (%) S (%) N (%) Cr (%) Ni (%)		Rp0.2 (N/mm²) Rp1 (N/mm²) A80 (%) A50 (%) HB B HRB T		Rp0.2 (N/mm²) Rp1 (N/mm²) A80 (%) A50 (%) HB B HRB T		Other controls: - Dimensions within tolerances, spectrochemical identity test OK - Corrosion Test EN ISO3651-2 Method A and ASTM A262 practice OK			
Test Position/Posizione Prova T-coil head Corrosion weight Break end		Test Direction/Direzione Prova Transverse Longitudinal Diagonal		Remarks about tensile test: - Confirmation of adequate degree of reliability for the uniformity over the strip length with certificate issued by TÜV Rheinland Group dt. June 18, 2019 - Tensile test according EN ISO 6892-1 B / A, SA 370		Remarks: - Surface finish 2B - We certify that products listed above comply with order requirements - Document validated acc. EN10204 part. 5 - Norms are intended in the valid edition at the time of the order - Durability: NPD		Remarks: - Regulated Substance: NPD - Intentional Uses: Building Construction or Civil Engineering - DCP available at <a href="http://www.marcegaglia.com/doc/qualita/qualita/00p.html">http://www.marcegaglia.com/doc/qualita/qualita/00p.html</a> - surface finish 2B		Other controls: - Dimensions within tolerances, spectrochemical identity test OK - Corrosion Test EN ISO3651-2 Method A and ASTM A262 practice OK			
Identification Nr 23EM001408 23EM001409		Test position Test direction B T B T		Mark 23RF011772 23RF011772		Rp0.2 (N/mm²) Rp1 (N/mm²) A80 (%) A50 (%) HB B HRB T		Rp0.2 (N/mm²) Rp1 (N/mm²) A80 (%) A50 (%) HB B HRB T		Other controls: - Dimensions within tolerances, spectrochemical identity test OK - Corrosion Test EN ISO3651-2 Method A and ASTM A262 practice OK			



## Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN

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

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

Technické parametry:

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

Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60