



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

OPTIMALIZACE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Martin Farkaš

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

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Farkaš** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **492715**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace laserového svařování korozivzdorných ocelí

Název bakalářské práce anglicky:

Optimization of laser welding of stainless steels

Pokyny pro vypracování:

- Analýza svařitelnosti korozivzdorných ocelí
- Popis principu laserového svařování a typy vhodných laserů pro svařování korozivzdorných ocelí
- Návrh vhodné konfigurace laserového svařovacího systému za účelem zajištění maximální efektivity vysokorychlostního svařovacího procesu a snížení nároku na zdroje
- Návrh a provedení experimentu – ověření navržené konfigurace a optimalizace laserového svařování
- Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Číhal Vladimír, Korozivzdorné oceli a slitiny, Academia, 2004
- [2] Folkhard Erich, Welding Metallurgy of Stainless Steels, Springer-Verlag, 2012
- [3] Katayama, Seiji, Fundamentals and Details of Laser Welding, Springer Singapore, 2020
- [4] Lawrence J. R. Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications, Woodhead Publishing, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování:

Úvodem této práce bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za vedení práce, cenné připomínky a konzultace, doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. a Ing. Jindřichu Zemanovi za komplexní spolupráci při laboratorní přípravě a ohledání vzorků.

Anotace

Název práce:	Optimalizace laserového svařování korozivzdorných ocelí
Autor práce:	Martin Farkaš
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2021/2022
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Počet stran: 59

Počet obrázků: 40

Počet tabulek: 6

Počet příloh: 0

Klíčová slova:

Laserové svařování, korozivzdorné oceli, vady svarů, optimalizace svařování

Abstract:

Práce je rozdělena na dva nosné pilíře, první částí je teoretické představení problematiky laserové svařovací technologie, zabývající se detailním popisem jednotlivých částí laserů a jeho možných technických modifikací se zaměřením na aplikační využití při svařování.

Druhá část se zabývá konkrétní aplikací vybrané svařovací technologie a možností její optimalizace pro vysokorychlostní svařování. Cílem výzkumné činnosti je dosažení požadované kvality povrchu a kvality svarových spojů (především s ohledem na provaření) při minimálním možném svařovacím výkonu.

Obě dvě části spolu přímo souvisejí, část druhá se odkazuje na již sdělené informace a poznatky, které jsou využívány pro volbu konkrétní technologie diskového svařovacího laseru i samotné použití ARM svařovacího módu.

Závěr práce je věnován vzájemnému porovnání výsledků metalografických zkoušek, vizuálního hodnocení a provozních parametrů. Jak na základě získaných dat vyplývá, je pro zajištění kvalitního výsledku svařování nutná vhodná kombinace parametrů, kterými jsou zejména: svařovací výkon, svařovací ohnisko, distribuce intenzity laserového záření uvnitř laserového paprsku včetně dostatečného průtoku ochranné atmosféry.

Annotation

Name of the these: Optimization of laser welding of stainless steels
Author: Martin Farkaš
Supervisor: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Academic year: 2021/2022
University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: 12133 - Department of manufacturing technology
Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Number of pages: 59

Number of pictures: 40

Number of charts: 6

Number of attachments: 0

Key words:

Laser welding, stainless steel, weld defects, welding optimization

Abstract:

The work is divided into two main pillars, the first part is a theoretical presentation of laser welding technology, dealing with a detailed description of individual parts of lasers and its possible technical modifications with a focus on application in welding.

The second part deals with the specific application of selected welding technology and the possibility of its optimization for high-speed welding. The aim of the research activity is to achieve the required surface quality and the quality of welded joints (especially with regard to penetration) with the minimum possible welding power.

The two parts are directly related, the second part refers to the information and knowledge already communicated, which are used to select a specific technology of disk welding laser and the use of ARM welding mode.

The conclusion of the work is devoted to the mutual comparison of the results of metallographic cuts, visual inspections and operating parameters. According to the obtained data, a suitable combination of parameters is necessary to ensure a quality welding result, which are in particular welding power, welding focus, distribution of laser radiation intensity inside the laser beam, including a sufficient flow of protective atmosphere.

Obsah

1.	Seznam zkratk a jednotek	10
2.	ÚVOD	12
3.	CÍLE PRÁCE	13
4.	ANALÝZA SVAŘITELNOSTI KOROZOVZDORNÝCH OCELÍ	14
5.	POPIS PRINCIPU LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	16
5.1.	Svařování	16
5.2.	Princip laserového svařování	16
5.3.	Specifika laserového svařování	16
5.4.	Porovnání laserového svařování s konvenčními metodami	17
6.	SVAŘOVACÍ ZDROJE	17
6.1.	Vznik laserového paprsku	17
6.1.1.	Základní pojmy vzniku laserového paprsku	17
6.1.2.	Popis vzniku laserového záření	18
6.2.	Laserový paprsek	19
6.2.1.	Základní parametry laserového paprsku	19
7.	SOUČÁSTI SVAŘOVACÍCH LASERŮ	20
7.1.	Svařovací zdroj	20
7.2.	Optické vlákno	21
7.3.	Optická hlava	21
8.	ROZDĚLENÍ TYPŮ LASERŮ	22
8.1.	Základní charakteristiky pro kategorizaci laserů	22
9.	PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	23
9.1.	Aktivní prostředí	23
9.2.	Matrice	23
9.3.	Aktivátor	23
9.4.	Buzení pevnolátkových laserů	24
9.5.	Nd:YAG lasery	24
9.6.	Diodový laser	25
9.7.	Vláknový laser (Fiber laser)	26
9.8.	Diskové lasery	26

10.	PLYNOVÉ LASERY	28
10.1.	Aktivní prostředí plynových laserů	28
10.2.	Buzení plynových laserů	28
10.3.	CO ₂ lasery	28
11.	POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK SVAŘOVACÍCH LASERŮ	29
11.1.	Kvalita laserového paprsku	29
11.2.	Vlnová délka laserového paprsku	29
11.3.	Účinnost laserových svařovacích zdrojů	30
12.	PROVOZNÍ REŽIMY LASERŮ	30
12.1.	Kontinuální režim (CW lasery)	30
12.2.	Pulzní a impulzní režim (PW lasery)	30
12.2.1.	Q-switch	31
13.	REŽIMY VYTVÁŘENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	32
13.1.	Konduktivní svary	32
13.2.	Keyhole svary	32
14.	DRUHY SVARŮ	32
14.1.	Bodové svary	32
14.2.	Kontinuální svary	33
15.	VADY SVARŮ	33
15.1.	Neprovařený kořen (označení podle EN ISO 6520 jako vada č. 402)	33
15.2.	Nadměrně propadlý kořen (EN ISO 6520 - 504)	33
15.3.	Prohloubený povrch svaru (EN ISO 6520 - 511)	34
15.4.	Rozstřík (EN ISO 6520 - 602)	34
15.5.	Zápal (EN ISO 6520 - 5011)	34
15.6.	Lineární přesazení (EN ISO 6520 -507)	35
15.7.	Humping	35
16.	VHODNOST TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ PRO PRŮMYSL	36
17.	DISTANČNÍ SVAŘOVÁNÍ (Remote welding)	36
18.	SVAŘOVÁNÍ VÍCEPAPRSKOVÝM ZDROJEM	37
18.1.	Svařování více paprskovým zdrojem stejné vlnové délky – metoda ARM.....	37
18.2.	Svařování více paprskovým zdrojem o různých vlnových délkách	38

19.	KONTROLA KVALITY SVAŘOVACÍHO PROCESU	39
19.1.	Předprocesní kontrola	39
19.2.	Procesní kontrola	39
19.3.	Poprocesní kontrola	39
20.	ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	40
21.	NÁVRH EXPERIMENTU	40
21.1.	Návrh komponent k testování.....	40
21.2.	Návrh přípravy svařovaných vzorků	41
21.3.	Návrh vyhodnocení	41
22.	POSTUP EXPERIMENTU	42
22.1.	Postup testování varianta č.1 – optické vlákno 100/400 μ m	42
22.2.	Postup testování varianta č.2 – optické vlákno 200/700 μ m	43
22.3.	Postup laboratorního vyhodnocení	44
22.3.1.	Postup laboratorní přípravy metalografických vzorků	44
22.3.2.	Postup laboratorního vyhodnocení vzorků.....	44
23.	VÝSLEDKY VYHODNOCENÍ.....	45
23.1.	Výsledky hodnocení svarových ploch pásky	45
23.2.	Výsledky ohledání výbrusů svaru	46
23.3.	Výsledek vyhodnocení mikrostruktury	52
24.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR	54
25.	Použité literární zdroje	55
26.	Seznam obrázků.....	58
27.	Seznam tabulek.....	59

1. Seznam zkratek a jednotek

Zkratka	Význam	Český význam
cca	Circa	Přibližně
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	Tepelně ovlivněná oblast
ARM	Adjustable Ring Mode	Režim nastavitelného prstence *
RT	Radiographic Testing	Rentgenové zkoušky
CW laser	Continuous Wave Laser	Laser s kontinuálním průběhem výkonu
PW laser	Pulsed Wave Laser	Laser s pulzním průběhem výkonu
SiO ₂	Oxid křemičitý	Oxid křemičitý
CO ₂	Oxid uhličitý	Oxid uhličitý
BPP	Beam Parameter Product	Kvalita paprsku
MIG	Metal Inert Gas	Svařování kovů v inertním plynu
TIG	Tungsten Inert Gas	Svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
Ni	Nikl	Nikl
Mn	Mangan	Mangan
Mo	Molybden	Molybden
W	Wolfram	Wolfram
DIN	Deutsches Institut für Normung	Německý institut pro normy a standardizace
YAG	Yttrium Aluminium Garnet	Yttrito hlinitý granát
DPSSL	Diode Pumped Solid State Laser	Diodový pevnolátkový laser
NDT	Non-destructive testing	Nedestruktivní testování
UT	Ultrasonic Testing	Ultrazvuková zkouška
VT	Visual Testing	Vizuální kontrola
PT	Penetration Testing	Kapilární zkouška
MT	Magnetic Particle Testing	Magnetická zkouška

* Překlad významu, český pojem není využíván

Zkratka	Jednotka
nm	Nanometr
μm	Mikrometr
mm	Milimetr
l	Litr
ms	Milisekunda
min	Minuta
h	Hodina
kW	Kilowatt
GW	Gigawatt

2. ÚVOD

V poslední dekádě lze zaznamenat výrazný vzestup technologie laserového svařování při implementacích v průmyslových aplikacích. Laserové svařování postupně vytlačuje dříve oblíbené technologie svařování. Výhodou je zejména menší velikost tepelně ovlivněné oblasti a eliminace spotřebního materiálu funkčních částí zařízení, jakými jsou např. svařovací elektrody konvenčních obloukových metod MIG, TIG. Neméně důležitým přínosem je i možnost svařování elektricky nevodivých materiálů.

Svařované díly jsou součástí nesčetného množství strojních konstrukcí napříč různými obory. Svařování nachází své místo jak v kusové, tak velkosériové výrobě, „pouze“ s rozdílem náhrady ručního svařování při kusové výrobě procesem automatizovaným pro výrobu sériovou. Na základě množství předpokládaných vyráběných kusů dochází k volbě daného řešení. Pro laserové svařování jsou vhodné především výrobky s předpokladem sériové výroby, v ruční výrobě je laserové svařování aplikováno zatím pouze výjimečně.

Konvenční svařovací metody, tedy dnes především nejvíce používané metody svařování elektrickým obloukem, jsou založeny na principu průchodu elektrického proudu svařencem, procházející proud napájí el. oblouk, který svým teplem zahřívá základní materiál, a to až do doby jeho roztavení a vzájemného spojení sousedních dílů. Laserové svařovací zdroje využívají schopnosti bezkontaktního natavení materiálu dopadem stimulovaného světelného záření v intenzivně fokusovaném paprsku s malou stopou dopadu, zahřívajícím a následně tavícím materiál, s kterým laserový paprsek přichází do kontaktu.

Bakalářská práce vznikla ve spolupráci s průmyslovým partnerem zabývajícím se návrhem a výrobou válcovacích linek pro svařované tenkostěnné profily. Předmětem zájmu spolupráce a zároveň hlavním tématem bakalářské práce je optimalizace svařovacího procesu korozivzdorné ocelové pásky o tloušťce 1,2 mm z materiálu EN 1.4509 (označení dle EN 12027-1 X2CrTiNb18).

Konkrétní technická specifikace svařovacího procesu pro analýzu v rámci řešení bakalářské práce je přímo podřízena požadavkům kladeným na výrobní linky a možnostem zpracovávaného materiálu, v tomto konkrétním případě se jedná o maximalizaci produktivity (rychlost svařování až $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) při dodržení požadovaných kvalitativních parametrů svaru (dostatečný průvar, minimalizace vad svaru). S tímto ohledem bylo zvoleno jako technické řešení pro další optimalizaci právě laserové svařování, které bude blíže popsáno v dalších kapitolách. Metoda svařování elektrickým obloukem by byla vhodná pro případy nižších požadavků na velikost svařovací rychlosti.

3. CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je optimalizace svařovacího procesu a nalezení přesné specifikace procesních parametrů při zpracování korozivzdorné ocelové pásky (o tloušťce 1,2 mm) laserovým kontinuálním svařováním.

Zásadní otázkou k výzkumu je zajištění minimálního potřebného svařovacího výkonu v kombinaci s požadovanou kvalitou svaru.

Výsledek práce by měl ověřit pozitivní přínos použití dvojitého svařovacího paprsku při aplikaci dle schématu Adjustable Ring Mode (ARM). Provedená analýza má být dostatečným podkladem pro výslednou volbu finální specifikace svařovací sestavy daného produktu v konkrétní průmyslové aplikaci.

Navrhované specifikace byly v plném rozsahu ověřeny při testovacím procesu, který byl detailně laboratorně analyzován.

4. ANALÝZA SVAŘITELNOSTI KOROZOVZDORNÝCH OCELÍ

Svařitelnost je komplexní charakteristika označující náročnost zpracování daného materiálu technologií svařování. Svařitelnost ocelí je zásadně ovlivněna konstrukčním umístěním svaru, technologickým zpracováním svařence a především chemickým složením materiálu, a to zejména obsahem uhlíku a legujících prvků.

Slovy oficiální definice, vycházející z normy ČSN 05 1309: 1990 (Svařitelnost kovů a její hodnocení) je svařitelnost kovů popsána poměrně obecnou formulací jako: „*komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svarku s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje.*“ [1]

Korozivzdornosti ocelí je dosahováno díky zvýšenému legování chromem (Cr), minimální požadavek pro zaručenou korozivzdornost oceli je dle evropské normy EN 10020 legování minimálně 10,5% Cr [2], případně v doprovodu dalších legur Ni, Mn, Mo, W atd. Oceli s obsahem legujících prvků přesahujících 5% jsou zařazovány do skupiny vysocelegovaných ocelí [3]. S ohledem na parametr minimální nutné koncentrace příměsi Cr pro zajištění korozivzdornosti oceli, patří veškeré korozivzdorné oceli mezi vysocelegované materiály.

K obecnému vyjádření svařitelnosti slouží Schaefflerův konstituční diagram [4], který znázorňuje vliv feritotvorných a austenitotvorných prvků na strukturu oceli. Diagram rozděluje korozivzdorné oceli do několika základních skupin dle jejich struktury, od kterých se odvíjí jejich svařitelnost a případné technologické požadavky procesu.

Základní skupiny korozivzdorných ocelí [4]:

1. Feritické oceli (Cr, Cr-Mo)
2. Martenzitické oceli (Cr, Cr-Mo + C)
3. Austenitické oceli (Cr-Ni + Mo, Mn)
4. A-F duplexní oceli

Chemické složení oceli EN 1.4509 je uvedeno v tabulce č. 1:

Tabulka 1: Složení testovaného materiálu EN 1.4509 [5]

Uhlík (C) [%]	Křemík (Si) [%]	Mangan (Mn) [%]	Fosfor (P) [%]
≤ 0,03	≤ 1	≤ 1	≤ 0,04
Síra (S) [%]	Chrom (Cr) [%]	Niob (Nb) [%]	Titan (Ti) [%]
≤ 0,015	17,5 ÷ 18,5	0,3 ÷ 1	0,1 ÷ 0,6

Výpočet chromového ekvivalentu pro EN 1.4509 [4]:

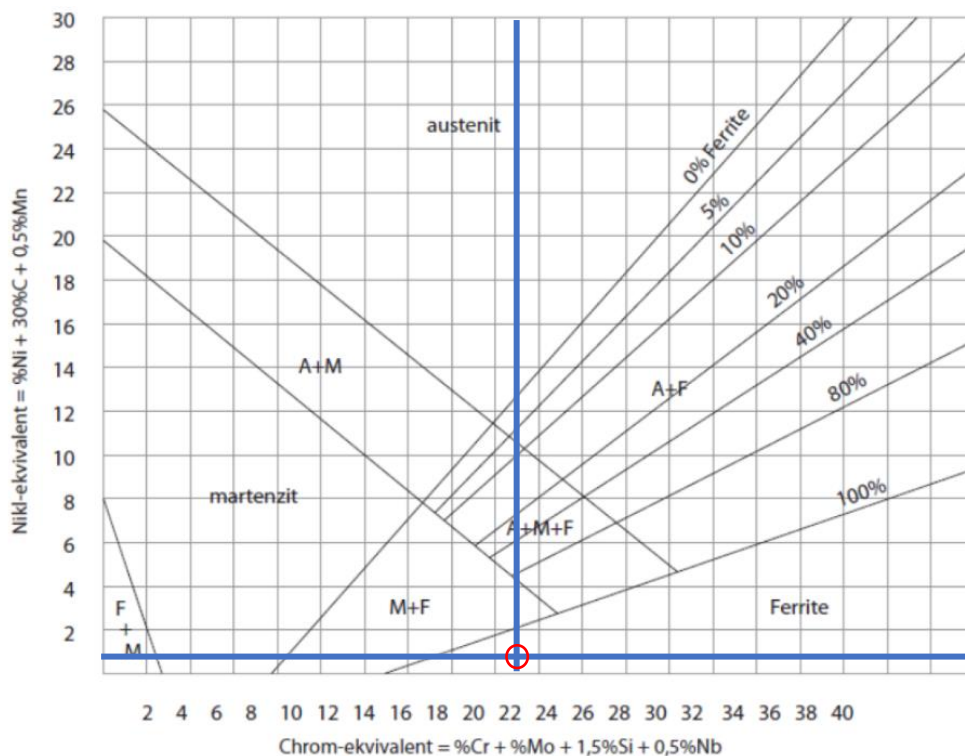
$$Cr_E = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (4.1)$$

$$Cr_E = 18 + 0 + 1,5 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,65 = 19,075 \text{ [%]}$$

Výpočet niklového ekvivalentu pro EN 1.4509 [4]:

$$Ni_E = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn = 0 + 30 \cdot 0,015 + 0,5 \cdot 0,5 = 0,7 \text{ [%]} \quad (4.2)$$

Na základě Schafferova konstitučního diagramu (obr. 1) spadá analyzovaná ocel EN 1.4509, použitá v bakalářské práci, do kategorie feritických ocelí. [6]



Obrázek 1: Schaefflerův konstituční diagram s vyznačenou pozicí zkoumané oceli [4]

K vyhodnocení svařitelnosti feritických korozivzdorných ocelí je důležité rozdělení na oceli s obsahem C do cca 0,08% a oceli s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků s $\Sigma C+N \leq 0,04\%$.

Oceli s obsahem C do 0,08% mají sklon ke vzniku martenzitu. V ohřevové části svařovacího cyklu může ve struktuře obsažený uhlík vyvolat vznik austenitu, který se při rychlém ochlazení transformuje na martenzit. K odstranění tohoto jevu oceli při svařování předežíváme (snižujeme rychlost ochlazení svarového

kovu - SK a tepelně ovlivněné oblasti - TOO). V oblasti přehřátí TOO obvykle dochází ke zhrubnutí zrna.

Oceli s nízkým obsahem intersticiálních prvků, tedy i v této práci použitá ocel EN 1.4509, standardně zachovávají feritickou strukturu i v TOO, nejsou náchylné ke vzniku trhlin za studena a obvykle se svařují bez předehřevu. Oceli s nízkým obsahem intersticiálních prvků jsou však náchylné ke zhrubnutí zrna svaru a TOO. Teplé zpracování žíháním je možné.

5. POPIS PRINCIPU LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ

5.1. Svařování

Svařování je technologie pro výrobu nerozebíratelných spojení dílů. Svařování může být prováděno na kovových i nekovových materiálech, a to i na těch, které jsou elektricky nevodivé. Elektrická vodivost materiálu je nutná v případech aplikace svařovacích metod za použití elektrického oblouku jako tepelného zdroje, případně při svařování elektrickým odporem.

5.2. Princip laserového svařování

Princip laserového svařování spočívá v bezkontaktním natavení materiálu laserovým paprskem, který je distribuován pomocí laserové optické hlavy na předem určené místo. Laserový paprsek je vybudovaný koherentní záření vysoké plošné hustoty vznikající při stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí rezonátoru. K natavení materiálu dochází díky absorpci energie svařovacího paprsku o vysoké energetické hustotě svařovaným materiálem. Parametry laserového paprsku jsou voleny dle vlastností svařovaného materiálu, mezi něž se řadí zejména teplota tání materiálu a jeho odrazivost povrchu vůči generované vlnové délce laserového záření. Odrazivost materiálu je daná nejen materiálem samotným, ale také úpravou jeho povrchu.

Standardní průmyslové svařovací lasery se skládají z několika základních částí, kterými jsou především: laserový zdroj s rezonátorem, kde se generuje laserové záření konkrétní vlnové délky, optická hlava uzpůsobená pro různé technologické aplikace (např. svařování). Laserový zdroj generuje elektromagnetické záření, které je (u pevnolátkových laserů dnes obvykle) přenášeno prostřednictvím optického vlákna do optické hlavy, ve které je záření fokusováno pomocí optických čoček na požadované místo (pracovní pozici). Optické čočky umožňují změnu pozice svařovacího ohniska, tedy vzdálenosti, ve které může být svařováno.

5.3. Specifika laserového svařování

Jelikož laserové svařování patří mezi bezkontaktní svařovací metody, je výrazným způsobem redukována míra opotřebení, kterému podléhají funkční komponenty zařízení, jakými jsou např. u metod MIG a TIG svařovací elektrody, trysky, hubice atp. S ohledem na uvedený fakt, je zaručena vysoká míra opakovatelnosti procesu, nezbytná zejména pro přesnou či velkosériovou výrobu.

Další výhodou laserového svařování je také vysoká čistota svarů zajištěná zejména při svařování bez přídavného materiálu, které by znamenalo zvýšení rizika vnesení nežádoucích nečistot.

V porovnání s konvenčními metodami tavného svařování, při kterých je v drtivé většině využíváno svařování pomocí elektrického oblouku, je dosaženo výrazné redukce velikosti tepelně ovlivněné oblasti. Tepelně ovlivněná oblast je považována za nežádoucí průvodní jev svařování z důvodu lokální změny struktury, a tím i mechanických a strukturních vlastností.

5.4. Porovnání laserového svařování s konvenčními metodami

V porovnání s konvenčními technologiemi umožňuje laserové svařování vznik nejmenší tepelně ovlivněné oblasti v okolí svaru. Menší TOO při laserovém svařování propůjčuje v porovnání s konvenčními metodami (MIG, TIG...) výrazně redukované vnitřní napětí a deformace svařenců, zmenšuje oblasti s negativně ovlivněným chemickým složením způsobující např. zhoršenou korozivzdornost ocelí. Další výhodou menší velikosti TOO je s tím přímo související snížená energetická náročnost procesu. V neposlední řadě lze uvést možnost svařování větších tloušťek stěn bez přídavného materiálu za vyšších svařovacích rychlostí.

6. SVAŘOVACÍ ZDROJE

6.1. Vznik laserového paprsku

6.1.1. Základní pojmy vzniku laserového paprsku

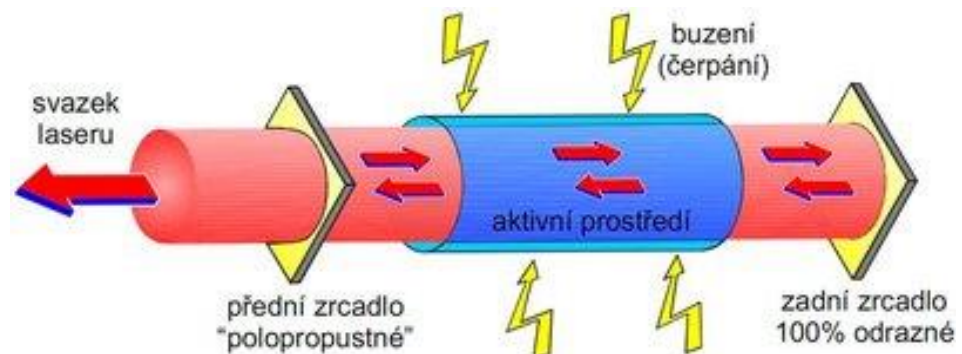
Laserové svařování a procesy s ním související se pojí s několika základními pojmy popsanými níže: [7]

- Absorpce
 - Pohlčení fotonu a přijmutí jeho energie využité k přesunu na vyšší energetickou hladinu. Pohlčená energie může být zpětně vyzářena do prostoru, případně uchována v atomu čímž dojde ke zvýšení jeho teploty (zvýšení kinetické energie částic).
- Excitace (vybuzení)
 - Fyzikální jev přechodu atomu na vyšší energetickou hladinu odpovídající absorbované energii pohlčeného fotonu. Absorpce fotonů může probíhat v přirozeném prostředí, stejně jako v prostředí uměle buzeném, ve kterém narůstá četnost výskytu excitace.
- Spontánní emise (vyzáření)
 - Spontánní emise je přirozený jev, při kterém dochází k vyzáření fotonu vlivem přechodu elektronu z energeticky vyšší hladiny do hladiny energeticky nižší. Podmínkou uskutečnění děje je předchozí vybuzení (tzv. excitace) elektronu z energeticky nižší a zároveň stabilní hladiny do hladiny energeticky vyšší. V této hladině je elektron nestabilní a má tendenci samovolného zpětného přechodu, což je doprovázeno vyzářením kvanta energie

- (ve formě fotonů). Vybuzení soustavy probíhá vnějším zdrojem energie, např. světlem nebo chemickou reakcí. [7,8,9]
- Stimulovaná emise
 - Stimulovaná emise je vynucený jev, při kterém dochází k emisi koherentního záření vlivem lavinového přechodu kvanta elektronů z energeticky vyšších hladin do hladin energeticky nižších. Podmínkou uskutečnění děje je předchozí náraz fotonů do elektronů o vlastní energii rovné velikosti rozdílu energetických hladin, mezi kterými dojde k přechodu elektronů. Vyzářené fotony mají stejnou charakteristiku jako fotony, které do atomů narazily, a se kterými se následně spojí. Spojením fotonů nastává zesílení elektromagnetických vln záření, což je považováno za základ laserového záření. Druhou podmínkou uskutečnění děje je předcházející vytvoření inverzní populace, tedy stavu, ve kterém je větší množství elektronů ve vybuzeném stavu energeticky vyšší hladiny než elektronů v energeticky nižší (základní) hladině. [7,9]
 - Aktivní prostředí
 - Aktivní prostředí je základním stavebním prvkem laserů, ve kterém probíhá stimulovaná emise fotonů. Je tvořeno látkou vhodnou pro vznik a uchování inverzní populace elektronů. Látky vhodné pro stavbu aktivního prostředí se od ostatních materiálů odlišují schopností uchování elektronů na vyšších energetických hladinách po výrazně delší dobu, nezbytnou pro setrvání v excitovaném stavu, až do doby dopadu stimulujícího fotonu z vnějšího zdroje. [10]
 - Optický rezonátor
 - Optický rezonátor je soustava dvou na paprsek kolmých zrcadel, kdy je jedno zrcadlo dokonale odrazivé (až 99,9%), zatímco druhé je odrazivé pouze částečně. Propustnost zrcadla stanovuje potřebnou intenzitu laserového paprsku pro opuštění optického rezonátoru. Mezi zrcadly je dále umístěno aktivní prostředí, ve kterém vhodným způsobem vybuzení vzniká prostřednictvím stimulované emise laserové záření (viz kapitola 6.1.2). [10,11]

6.1.2. Popis vzniku laserového záření

Princip vzniku laserového paprsku je založen na stimulované emisi koherentního elektromagnetického záření vznikajícího v aktivním prostředí laseru. Stimulovaná emise je uměle vyvolaný jev,



Obrázek 2: Schéma vzniku laserového záření [12]

při kterém dopadají fotony (případně jiné částice) na elektrony atomů v excitovaném stavu a způsobují přechod elektronů z vyšších energetických hladin do hladin nižších, přičemž jsou vyzařovány nové fotony stejných parametrů, jakými disponují dopadající fotony (případně jiné částice). Popsaný proces probíhá řetězově v celém aktivním prostředí, a to ještě za podpory optického rezonátoru, který způsobuje opakovaný průchod stimulovaného záření aktivním prostředím vedoucím k jeho opakovanému zesílení až do doby dosažení požadované intenzity záření. Záření zesílené na požadovanou úroveň již není dále odráženo zpět do aktivního prostředí, ale prochází skrz částečně propustné zrcadlo ven z laserového rezonátoru. Dle konkrétní konstrukce laseru prochází laserový paprsek přímo do optické hlavy, případně je do ní transportován optickým vláknem či pevným optickým členem. [13]

6.2. Laserový paprsek

Laserový paprsek je elektromagnetické koherentní záření, tedy záření o stejné vlnové délce a shodné amplitudě. Zároveň má záření velmi malou divergenci, která je označována jako kvalita svaru, anglickou zkratkou BPP – Beam parameter product. [14]

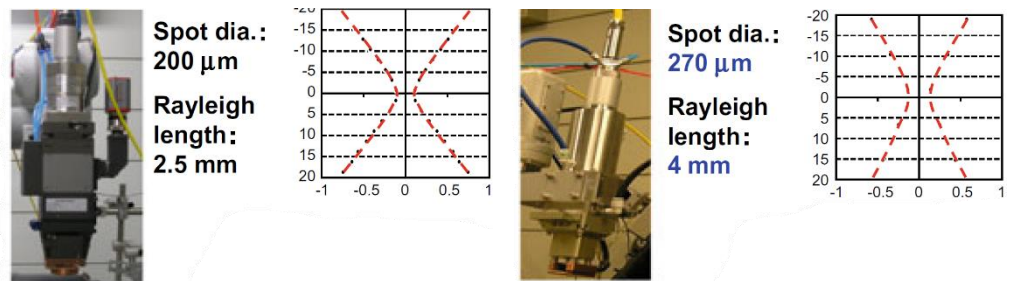
Označení „laser“ je zkratkou z anglického pojmu „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“ [10], v překladu se tedy jedná o „zesilování světla stimulovanou emisí záření“.

6.2.1. Základní parametry laserového paprsku

Při technologických aplikacích rozeznáváme následující základní procesní parametry: [7]

- Koherentní záření
 - Záření tvořené jednou vlnovou délkou a konstantním fázovým posunem mezi jednotlivými paprsky.
- Výkon laseru
 - Energie vyzářená laserovým paprskem za dobu jedné sekundy. Jedná se o jedno ze základních uživatelských nastavení laseru. Při zachování velikosti stopy dopadu roste s výkonem i energetická hustota paprsku. Označení je nejčastěji uváděno v jednotkách W.
- Energie pulzu
 - Pojem využívaný zejména u aplikací pulzních laserů, popisuje množství energie jednoho pulzu. Označení je nejčastěji prováděno v jednotkách J.
- Frekvence a délka pulzu
 - Pojem využívaný u aplikací pulzních laserů, jedná se o charakteristiku časového průběhu pulzu. Pro frekvenci používáme jednotku Hz, pro délku pulzu ms.

- Ohnisková vzdálenost
 - Vzdálenost spotu od fokusační čočky optické hlavy. Určuje vzdálenost optické hlavy od povrchu svaru. Využívanou měrnou jednotkou je mm.
- Spot (stopa dopadu) laserového paprsku
 - Průměr pracovní oblasti fokusovaného laserového paprsku, obvykle bývá umístěn v oblasti povrchu svaru. Vzájemná pozice svařovacího spotu od povrchu svaru je jedním z určujících parametrů pro energetickou hustotu dopadajícího záření na povrch svaru. Označení je prováděno v jednotkách μm .
- Vlnová délka
 - Nejkratší vzdálenost dvou kmitajících bodů stejné fáze. V laserových aplikacích je pro tento parametr používána jednotka nm.
- Kvalita paprsku
 - Kvalita paprsku vyjadřuje jeho samovolnou rozbíhavost, s rostoucí kvalitou paprsku klesá velikost parametru. Měrnou jednotkou je $\text{mm} \cdot \text{mrad}$.
- Energetická hustota paprsku
 - Velikost energie paprsku působící na jednotku plochy, jednotkou je $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Rayleighova vzdálenost
 - Vzdálenost mezi místem laserového paprsku v jeho nejužším místě a místem kde má dvojnásobnou hodnotu průřezu. Měření probíhá v mm.



Obrázek 3: Znárodnění Rayleighovy vzdálenosti o velikosti 2,5mm [7]

Obrázek 3: Znárodnění Rayleighovy vzdálenosti o velikosti 4mm [7]

7. SOUČÁSTI SVAŘOVACÍCH LASERŮ

7.1. Svařovací zdroj

Zdroj laserového paprsku, může mít více konstrukčních řešení, u laserů používaných v průmyslu se nejčastěji používají následující typy: pevnolátkové, např. Nd:YAG, vláknové, diskové a plynové, např. CO₂. V principu se vždy jedná o kombinaci aktivního prostředí, způsobu buzení a konstrukčního uspořádání optického rezonátoru, konstrukce rezonátoru je blíže popsána v kapitole 6.1.1. Na výstupu ze svařovacího zdroje je dle zvolené varianty připojena optická hlava, pevný optický člen nebo optické vlákno propojující laserový zdroj se samostatně montovanou optickou hlavou.

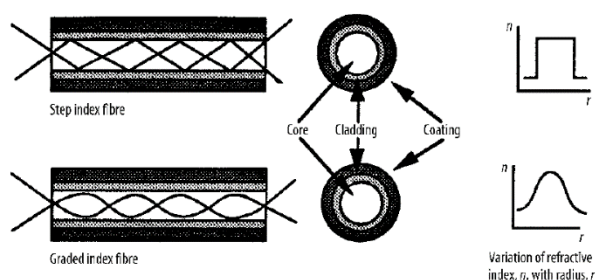
7.2. Optické vlákno

Flexibilní propojovací člen laserového svařovacího zdroje a optické hlavy. Optická vlákna používaná pro přenos laserového paprsku vyrobená z oxidu křemičitého (SiO_2) jsou vhodná pro přenos záření o vlnové délce cca 1000 až 1200 nm, případně pro přenos záření o vlnových délkách cca 800 nm a 1600 nm, při přenosu záření krátkých či dlouhých vlnových délek dochází k nadměrným ztrátám výkonu. [7] Optická vlákna jsou primárně určena pro přenos viditelného záření o vlnové délce cca 400 až 700nm, díky podobné vlnové délce je ale možná optická vlákna využít i pro přenos infračerveného (laserového) záření.

Právě z důvodu vysokých ztrát při vedení záření dlouhých vlnových délek nejsou optická vlákna používána v kombinaci s CO_2 lasery, ty mají vlnovou délku 10 600 nm (tedy zhruba desetinásobnou).

Základem optického vlákna je přenosové jádro (core) z SiO_2 o průměru 100 ÷ 700 μm [7].

Jádro má velice dobrou vodivost elektromagnetického záření, které je v jádře udrženo díky využití principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí (jádra vs. opláštění). Okolní opláštění (cladding) funguje jako odrazivý obal díky rozdílnému indexu lomu. Vnější část optického vlákna (coating) je chráněna nejčastěji plastovým obalem (viz obr. 5).



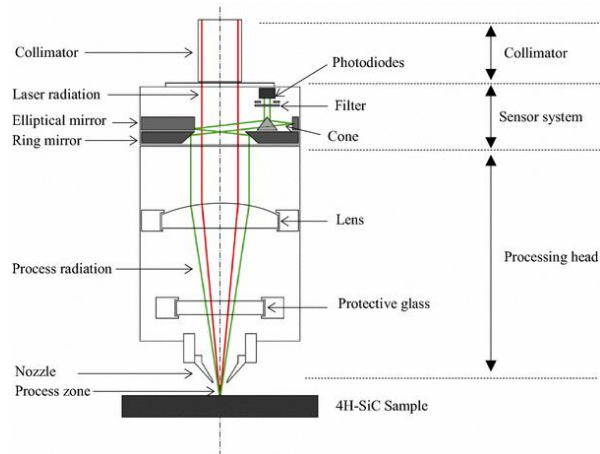
Obrázek 5: Princip distribuce záření optickým vláknem [15]

7.3. Optická hlava

Optická hlava, někdy také nazývaná procesní hlava je jednou ze základních součástí svařovacích laserů. Slouží ke zpracování laserového paprsku do potřebného tvaru a pozice vůči svařované součásti. Skládá se z (viz obr.6) [16]:

- Kolimátoru (Collimator)
 - Součást obvykle umístěná na vstupu do procesní hlavy, která slouží k usměrnění rozbíhajících se paprsků záření do vzájemně rovnoběžného směru. Umožňuje kvalitnější zaostření do malých průměrů paprsku.
- Fokusační optiky (Processing head)
 - Optická čočka (lens) s funkcí spojky, tedy čočka mění rovnoběžný svazek paprsku na sbíhavý s ohniskem umístěným v oblasti svaru. V případě přívodu laserového paprsku mimo osu optické čočky je paprsek naveden za pomoci zrcadel do požadované (osové) pozice vůči čočce.
- Senzorické části (Senzor systém)
 - Kontrolní systém pro sledování kvalitativních parametrů laserového paprsku.

- Těla s ochranným sklem
 - Nosná konstrukce s ochranným sklem (protective glass) chrání fokusační optiku a další vnitřní komponenty procesní hlavy před znečištěním pocházejícím zejména z procesu svařování. Laserový paprsek prochází ochranným sklem umístěným mezi místem svařování a optickou čočkou.



Obrázek 4: Schéma optické hlavy [16]

- Trysky (Nozzle)
 - Díl sloužící k usměrnění toku ochranné atmosféry kolem laserového paprsku. Ochranná atmosféra chrání svařovací bod před oxidací způsobenou negativním působením okolní atmosféry na svarovou lázeň.

8. ROZDĚLENÍ TYPŮ LASERŮ

8.1. Základní charakteristiky pro kategorizaci laserů

- Druh aktivního prostředí
- Velikost vlnové délky záření
- Typ kvantových přechodů
- Typ buzení
- Typ pracovního režimu (CW, PW)

Rozdělení laserů dle aktivního prostředí:

- Pevnolátkové
- Polovodičové
- Plynové
- Kapalinové (v průmyslové praxi nejsou používány)

Dělení dle vlnové délky paprsku

- Infračervené
- Viditelného pásma
- Ultrafialové
- Rentgenové

Dělení dle časového průběhu záření

- Pulsní a impulsní (PW)
- Kontinuální (CW)

Dělení dle doby trvání impulsu

- S dlouhými impulsy
- S krátkými impulsy
- S velmi krátkými impulsy (pikosekundové, femtosekundové) [7]

9. PEVNOLÁTKOVÉ LASERY

9.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je tvořeno dielektrikem, pevnou opticky propustnou látkou, která je účinným luminoforem. Aktivní prostředí se skládá z válcového krystalu s matným povrchem a leštěnými čely, matrice obsahují poměrně malou koncentraci stechiometricky uložených iontů aktivátoru. [17]

9.2. Matrice

Pojem pro označení základního materiálu aktivního prostředí pevnolátkových laserů. Určuje základní vlastnosti krystalu aktivního prostředí. Jsou na něj kladeny nároky na maximální průzračnost, pevnost, tepelnou odolnost, chemickou stabilitu a snadné opracování leštěním. K výrobě mohou být využity [17,18]:

- Krystaly
 - Oxidy (např. Al_2O_3)
 - Základ rubínových laserů
 - Granáty ($\text{A}_3\text{B}_5\text{O}_{12}$)
 - Základ YAG laserů
 - Alumináty (YAIO_3)
 - Základ YAP laserů
- Skla
 - Neodymové sklo (Nd:glass)

9.3. Aktivátor

Aktivátory (luminiscenční centra) jsou atomy a ionty umístěné v matrici aktivního prostředí, které jsou nezbytnou součástí procesu generace optického záření. Základním požadavkem na zvolený materiál je přítomnost nezaplňené vnitřní slupky elektronového obalu. Dalšími požadavky jsou [17]:

- Minimální šířka spektrální čáry na laserovém kvantovém přechodu
- Vysoký kvantový výtěžek luminiscence
- Silné absorpční pásy, které zvyšují účinnost buzení

Mezi vybrané materiály splňující uvedené požadavky patří např.:

- Trojmocný iont chromu (Cr^{3+})
 - Aktivátor v rubínovém laseru
- Trojmocný iont neodymu (Nd^{3+})
 - Aktivátor v Nd:YAG laseru
- Trojmocný iont ytterbia (Yb^{3+})
 - Aktivátor v Yb:YAG laseru

9.4. Buzení pevnolátkových laserů

Buzení laserů může být prováděno optickým výbojem speciálně vybraných výbojek, diod či laserového záření jiné vlnové délky. V minulosti bylo hojně využíváno zejména xenonových (impulsních) nebo kryptonových (kontinuálních) výbojek. Tyto výbojky byly vybrány zejména z důvodu shodného emisního spektra záření.

Výbojka se skládá z přímé nebo spirálovité křemenné trubice, naplněné plynem, nejčastěji xenonem. Na obou koncích výbojky jsou zataveny dvě elektrody. Výbojka (diody) je umístěna i s aktivním prostředím do budící dutiny minimalizující ztráty světelné energie, odražené nebo špatně mířené světlo odráží a směřuje budící dutina do aktivního prostředí. Na pozici výstupu z budící dutiny je snížena odrazivost, část záření o dostatečné energii projde tímto místem, a je dále distribuována za pomoci optického vlákna, případně pevných optických členů. Kontinuální lasery mají odrazivost částečně propustného zrcadla v rozmezí 90 až 99,9 %, zatímco pulsní lasery mají zrcadlo o odrazivosti pouze 8 až 50 %.

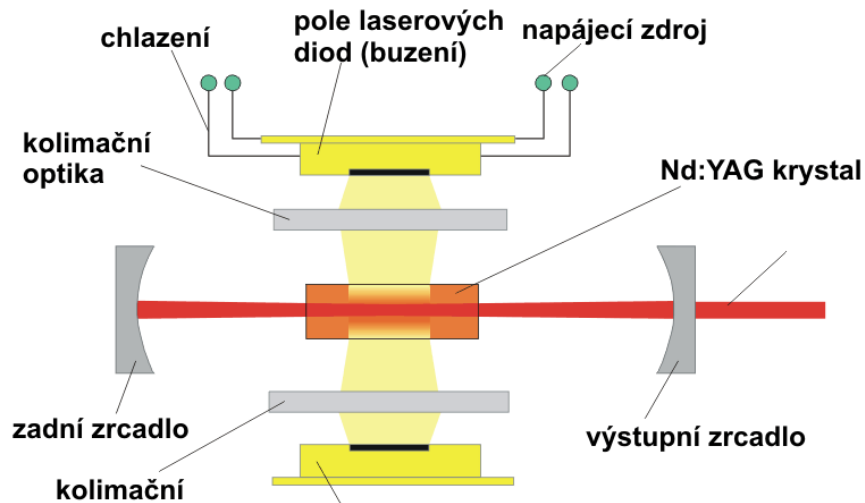
Buzení výbojkami je dnes již využíváno málo, častěji je buzení prováděno polem diod. A to zejména z důvodu životnosti výbojek (cca 5 000 hodin), zatímco diody mají životnost 4x větší (20 000 h). [7]

9.5. Nd:YAG lasery

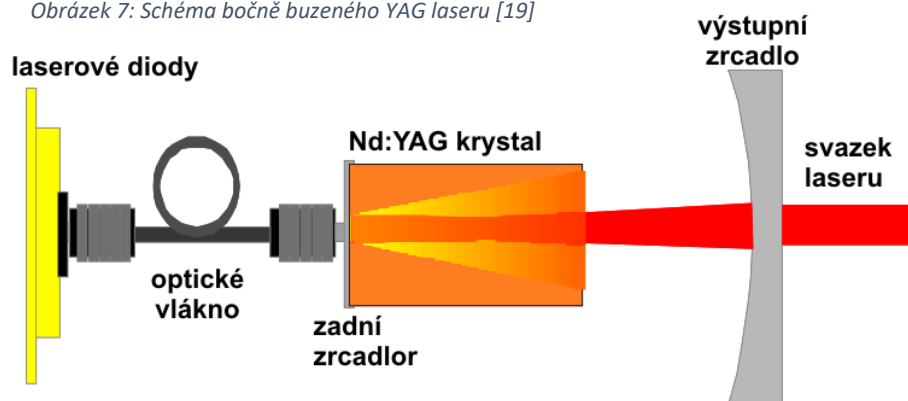
Jedná se o nejrozšířenější konstrukční řešení pevnolátkových laserů, jehož označení vyplývá z použitého aktivního prostředí tvořeného yttrito hlinitým granátem (YAG) dopovaným neodymovými ionty (Nd^{3+}). Jako jediný druh laseru není pojmenován dle dispozice funkčních komponent, ale materiálu aktivního prostředí (např. vláknový a diodový laser). Jedná se o lasery používané zejména pro pulzní svařovací aplikace. Kontinuální svařování pomocí Nd:YAG laserů není v praxi téměř využíváno z důvodu účinnosti technologie překonané účinnostmi diskových a vláknových laserů, přesto jsou Nd:YAG lasery stále jedny z nejvíce využívaných druhů laserových zdrojů. Vlnová délka záření Nd:YAG laserů odpovídá hodnotě 1064 nm, případně je možné dosažení vlnových délek 940, 1120, 1320 a 1440 nm, to ale pouze za cenu snížené účinnosti. S ohledem na vhodnou vlnovou délku záření umožňují Nd:YAG lasery oddělení zdroje od optické hlavy, a to díky možnosti přenosu laserového záření optickým vláknem. [7]

Nd:YAG lasery můžeme rozdělit do dvou základních podskupin dle orientace buzení. Prvním typem je buzení boční, konstrukčně odpovídající obr. 7, které je vhodné pro aplikace s požadavkem vyšších svařovacích výkonů.

Druhým typem je buzení zadní, konstrukčně odpovídající obr. 8. Budící záření je v tomto případě vedeno optickým vláknem do Nd:YAG krystalu, diody mohou být umístěny mimo zařízení a zajišťují vysokou kvalitu optického svazku při nižších svařovacích výkonech.



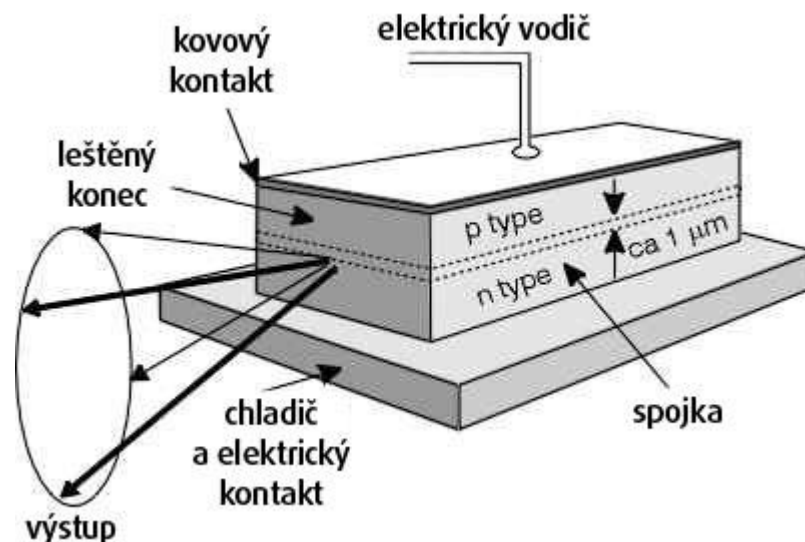
Obrázek 7: Schéma bočně buzeného YAG laseru [19]



Obrázek 8: Schéma zado buzeného YAG laseru [19]

9.6. Diodový laser

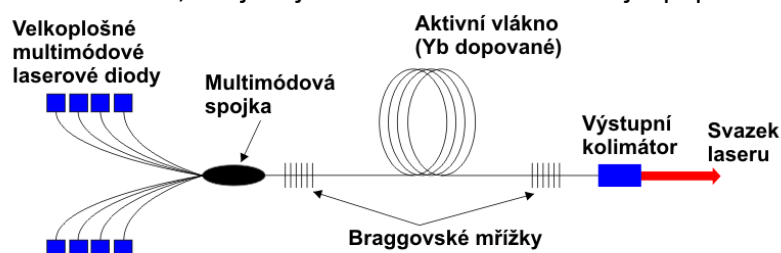
Vlnová délka vyzářená diodovým laserem dosahuje hodnoty v rozmezí 808 až 980 nm. Jedná se o zdroj, jehož aktivním prostředím je polovodičová dioda, umožňující změnu vlnové délky emitovaného záření danou chemickým složením diody. Diodové lasery jsou základním typem polovodičových laserů, které nad rámec zařazení do pevnolátkových laserů mohou být zařazovány do speciální skupiny polovodičových laserů. Stimulovaná emise vzniká při rekombinaci elektronů a kladných děr aktivní vrstvy umístěné mezi polovodičovou P a N vrstvou. Mezi výhody řadíme kompaktní rozměry, nízké výrobní náklady a možnost výkonové modulace. K nevýhodám řadíme zejména špatnou kvalitou laserového paprsku. V některých publikacích můžeme spatřit anglické označení diode-pumped solid-state laser se zkratkou DPSSL. [7]



Obrázek 9: Schéma diodového laseru [20]

9.7. Vlákňový laser (Fiber laser)

Vlnová délka laserového záření vlákňového laseru dosahuje 1064nm. Aktivní prostředí je tvořeno samotným optickým vláknem, ve kterém probíhá buzení laserového záření. Vlákna jsou dopována vzácnými zeminami, ke kterým patří rebiium, ytterbium či prazeodym. Buzení pomocí diod je realizováno přes optickou spojku vedenou do aktivního prostředí tvořeného optickým vláknem. [7]. Zrcadla jsou nahrazena Braggovskými mřížkami integrovanými přímo do optického vlákna, stejně jako u ostatních laserů je paprsek usměrňován



Obrázek 10: Schéma vlákňového laseru [19]

kolimátorem. Optický rezonátor se nachází podél vlákna, se kterým tvoří kompaktní celek bez potřeby dalšího nastavování. Buzení je prováděno LED diodami. Laserový paprsek je úzký a koncentrovaný, zajišťuje minimalizaci spotřeby elektrické energie potřebné pro provedení svaru. Výše popsaný systém odpovídá schématu zado buzených laserů (viz. obr. 8), přičemž se kvalitou paprsku řadí k těm nejkvalitnějším. Vlákňové lasery disponují účinností až 50% [7], ve spojení s vysokou kvalitou laserového paprsku a nadstandardní životností (až 100 000 hodin) jsou vlákňové lasery vůči ostatním svařovacím laserům na výši. [21]

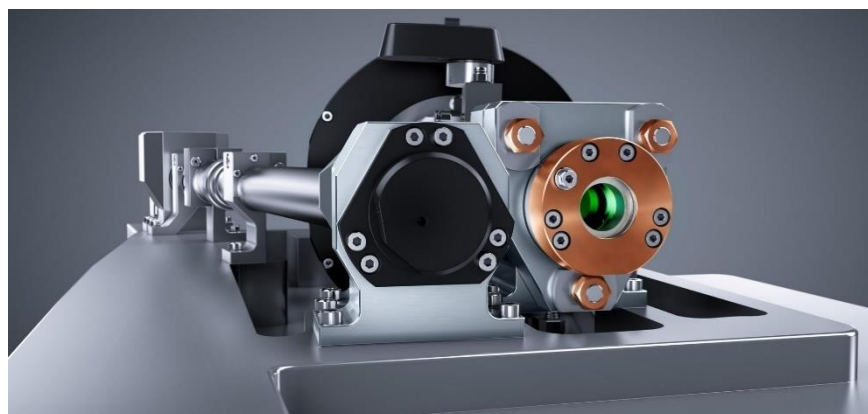
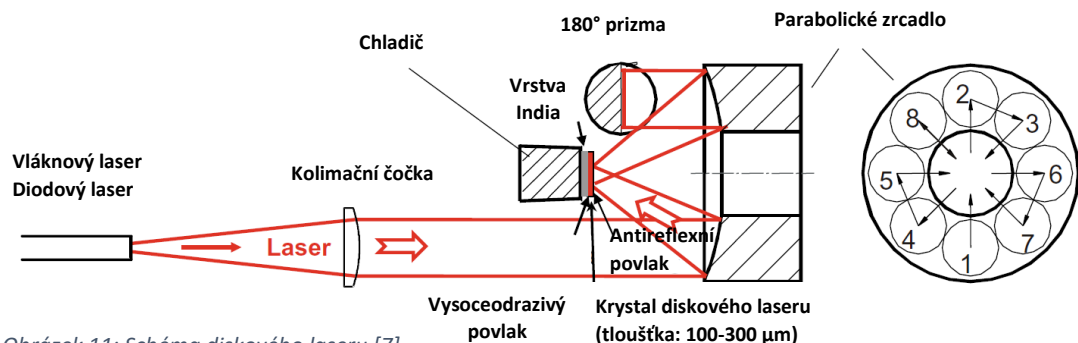
9.8. Diskové lasery

Vlnová délka záření diskového laseru dosahuje hodnoty 1030 nm. Aktivní prostředí má tvar disku a je nejčastěji dopováno neodymem (Nd) nebo yttrierbiem (Yb). Buzení zajišťuje obvykle vlákňový laser, jehož paprsek je usměrňován v kolimátoru se zacílením do parabolického zrcadla, druhou možností je nahrazení budícího vlákňového laseru světelnými diodami

s totožným zacílením. Paprsek je opakovaně odrážen do aktivního prostředí parabolickým nepropustným zrcadlem se středovým otvorem, kterým posléze vychází vybuzený laserový paprsek (viz obr. 11) [7]. Díky designu aktivního prostředí, připomínajícímu tvar mince, disponuje diskový laser vysokou výkonovou stabilitu bez ohledu na přesné udržení jeho teploty zajištěné vnějším zdrojem chlazení. Změna výkonu je možná i při zachování její hustoty v aktivním prostředí, při zvyšování výkonnostních požadavků jsou zvětšovány rozměry aktivního prostředí a s tím také související rozměry laserového paprsku. Omezení maximálního výkonu diskových laserů nebylo zatím nalezeno, v aktuálním období dosahují komerčně dostupné lasery výkonu až 16 kW. Buzené body na discích jsou ve srovnání s ostatními lasery poměrně velké, budící diody proto mohou disponovat nižší kvalitou paprsku ($500 \div 600 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$). [22]

Diskové lasery jsou v principu modifikací Nd:YAG laseru (viz kapitola 9.5) se špatnou kvalitou svazku. Aktivní prostředí je však na rozdíl od konvenčního Nd:YAG laseru (kde je aktivní prostředí ve formě tyčového krystalu) ve tvaru disku (viz obr. 11), díky přesnému tvaru generuje kvalitní svazek a energetickou účinnost až 25%. [7]

Volba konkrétního svařovacího laseru je souborem více vstupů, mezi které řadíme nejen technické vlastnosti produktu, ale také jeho provozní náklady, spolehlivost provozu či požadavkům kladeným na obsluhu zařízení. Z důvodu celkově pozitivních zkušeností pocházejících z předchozích aplikací diskových laserů zadávající firmou, bude pro další návrh využít právě diskový laser.



Obrázek 12: Vizualizace diskového laseru Trumf [23]

10. PLYNOVÉ LASERY

10.1. Aktivní prostředí plynových laserů

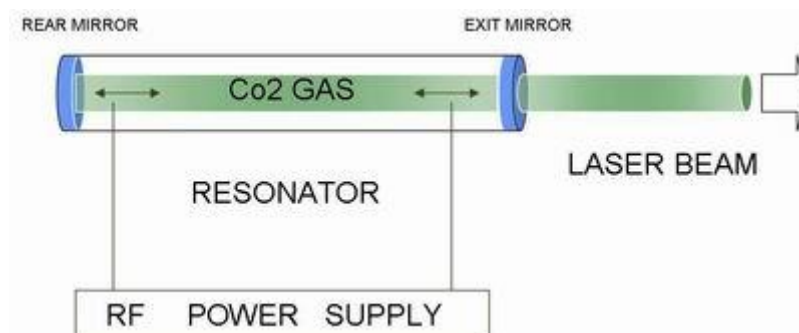
Aktivní prostředí plynových laserů se skládá ze směsice plynů zajišťujících nejen podporu stimulované emise, ale také chlazení a stabilizaci procházejícího laserového paprsku. Použití plynného aktivního prostředí sebou nese několik rozdílových faktorů vůči laserům pevnolátkovým popsaným v kapitole 9, mezi ně patří např. snížená rozbíhavost paprsku a malá šířka spektrálních čar zajištěná vyšší homogenitou aktivního prostředí. Plynné aktivní prostředí disponuje nízkou hustotou počtu aktivních částic, ústící na nízké poměry výkonu a velikosti laserů. Plynové lasery jsou proto při stejných výkonech výrazně rozměrnější než lasery pevnolátkové. [25]

10.2. Buzení plynových laserů

Buzení laserů může být zajištěno radio – frekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC). Buzení je prováděno elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku urychlených elektronů nebo opticky. Optické buzení není však s ohledem na malou spektrální šířku čar účinné. [7]

10.3. CO₂ lasery

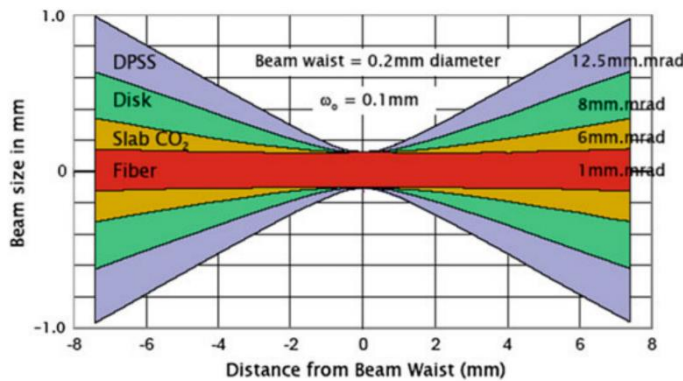
CO₂ lasery jsou s přehledem nejpoužívanějším typem plynového laseru, patří mezi zakladatele laserového svařování a celkově jednu z nejpoužívanějších konstrukčních variant komerčních laserových zdrojů. Vlnová délka záření je 10 600 nm [7], tedy zhruba desetinásobná vůči nejběžnějším pevnolátkovým laserům. Z důvodu nadměrně velké vlnové délky nelze používat optická vlákna k transportu paprsku, vlnová délka by zapříčinila enormní výkonové ztráty, je tedy nutné používat pevné optické prvky. Aktivní prostředí se skládá ze směsi následujících složek: helium (He) 65%, oxid uhličitý (CO₂) 10 ÷ 20%, dusík (N₂) 10 ÷ 20%, vodík (H₂) 1 ÷ 5%. [24] Základní složkou je CO₂, ve které jako jediné dochází ke stimulované emisi, z čehož také vychází pojmenování tohoto typu laseru. He a H₂ chladí procházející laserový paprsek, N₂ napomáhá udržení inverzní populace elektronů. [25]



Obrázek 13: Schéma CO₂ laseru [19]

11. POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK SVAŘOVACÍCH LASERŮ

11.1. Kvalita laserového paprsku



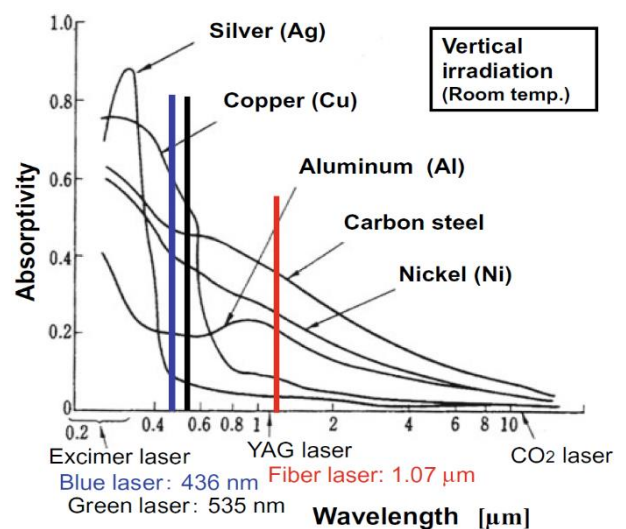
Obrázek 14: Porovnání vlivu rozdílné kvality laserového paprsku (BPP) [7]

v závislosti na vzdálenosti od počátečního bodu (vodorovná osa) a kvalitě paprsku (popis v pravé části). Nejnižší kvalitu paprsku mají diodové lasery (DPSSL), které jsou následovány lasery diskových. Lepší BPP již vidíme u CO₂ laserů, zatímco nejlepší výsledek můžeme spatřit u laserů vláknových (Fiber laserů).

Kvalita laserového paprsku (BPP) je dána typem konstrukce laseru, výkonem a přesností jeho výroby. Alespoň základní rozdělení dle hlavního určujícího faktoru, kterým je typ laseru můžeme nalézt na obr. 14, na kterém je znázorněna velikost laserového paprsku (svislá osa)

11.2. Vlnová délka laserového paprsku

Vlnová délka většiny průmyslových laserů se nachází v oblasti infračerveného záření (viz obr. 16) a přímo ovlivňuje efektivitu svařovacího procesu, konkrétně tedy absorptivitu (svislá osa v grafu na obr. 15) laserového paprsku povrchem konkrétního materiálu. Do určité meze platí pravidlo, že s klesající vlnovou délkou (vodorovná osa v grafu) roste absorptivita materiálu (viz obr. 15). Právě z důvodu vysoké odrazivosti některých materiálů, mezi které patří např. měď a nikl byly zkonstruovány lasery kratších vlnových délek (zelený 535 nm, modrý 436 nm), které slouží právě pro svařování vysoce odrazivých materiálů a jejich slitin.

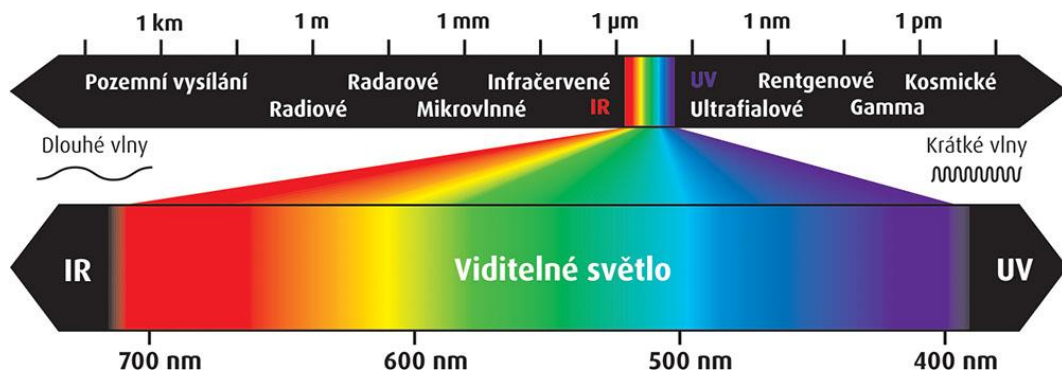


Obrázek 15: Závislost absorptivity na vlnové délce [7]

Tabulka 2: Porovnání vlnových délek laserů [7]

Vlnová délka záření laserů					
	YAG laser	Diodový laser	Vláknový laser	Diskový laser	CO ₂ laser
Vlnová délka [nm]	1064	808 ÷ 980	1064	1030	10 600

U nejčastěji svařovaných uhlíkových a korozivzdorných ocelí toto neplatí a jsou zde používány svařovací lasery standardních vlnových délek vykazujících výrazně vyšší účinnosti generace laserového paprsku.



Obrázek 16: Rozdělení elektromagnetického záření dle vlnové délky [26]

11.3. Účinnost laserových svařovacích zdrojů

Maximální účinnost svařovacích laserů dosahuje hodnoty 50%, zbývající energie je disipována a přebytečné teplo musí být odváděno chlazením. V závislosti na účinnosti zdroje a jeho výkonu je chlazení dle potřebné intenzity zajištěno a) vzduchem b) vodním chlazením. Nedostatečný odvod tepla vede k posunu spektrálních čar záření vedoucí k přerušení generování laserového záření.

Tabulka 3: Porovnání účinnosti laserových zdrojů [7]

Účinnost laserových zdrojů					
	YAG laser	Diodový laser	Vláknový laser	Diskový laser	CO ₂ laser
Účinnost [%]	1 ÷ 10	20 ÷ 50	20 ÷ 50	15 ÷ 25	10 ÷ 20

12. PROVOZNÍ REŽIMY LASERŮ

12.1. Kontinuální režim (CW lasery)

Jedná se o lasery s konstantními provozními parametry např. pro výrobu „nekonečných“ svarů, okamžitý výkon odpovídá průměrnému výkonu. Výkony nejslabších laserů mohou být méně než 1 mW, zatímco vysoko výkonové aplikace mohou dosahovat vyšších desítek kW.

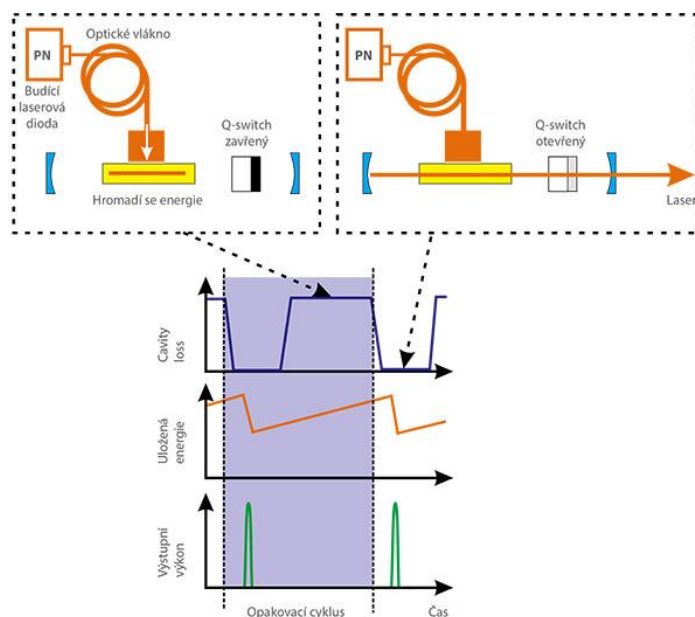
12.2. Pulzní a impulzní režim (PW lasery)

Svařovací lasery můžeme rozdělit také dle časového průběhu svařovacích sekvencí. Na rozdíl od nejjednodušších kontinuálních svařovacích principů vznikají také potřeby aplikace výroby přerušovaných svarů. Pro výrobu přerušovaných svarů jsou vhodné lasery s proměnným, časově závislým, průběhem svařovacího výkonu. Jedná se o svařovací zdroje, které na rozdíl od kontinuálních CW laserů svařují pouze v předem určených časových intervalech, které jsou určeny dle požadavků na svar. Jsou vhodné na méně namáhané aplikace bez potřeby těsnosti svaru. Produktem procesu jsou zejména bodové svary a svary přerušované jakékoli geometrie (koutové, tupé, rohové...).

Přesná specifikace svařovacího výkonu a dalších parametrů se odvíjí od konkrétního užití a jeho optimalizace. Optimalizací rozumíme zejména modifikované začátky a konce svařovacích pulzů ovlivňujících výskyt vad svarů. Prostý čtvercový průběh vede k rozstříku svaru, vakancím, propadům povrchové části, nadměrnému pnutí a trhlinám, při doplnění postupného náběhu a doběhu svařovacího výkonu dochází k výrazné redukci výskytu vad. Pulzní lasery jsou ve své podstatě stále buzeny nezávisle na časovém průběhu dodávaného svařovacího výkonu, laserový paprsek je pouze přesně dávkován speciálním zařízením určeným pouze pro tento účel. Řízení průběhu svařovacího výkonu může být zajištěno např. Q-switchem, princip jeho funkce je uveden níže. Časová délka pulzů se standardně pohybuje v řádech nanosekund až sekund, ve výjimečných aplikacích až v řádech femtosekund. [7]

12.2.1. Q-switch

Součástí laserového zdroje umožňující převod kontinuálního na pulzní cyklus. Zjednodušeně řečeno se jedná o překážku v cestě laserového paprsku při průchodu optickým rezonátorem, čímž je zastaven výstup laserového paprsku z laserového zdroje, zatímco není zastavena stimulovaná emise uvnitř aktivního prostředí, výkon jednotlivých pulzů je tedy s ohledem na prodloužený čas buzení narůstajícího množství částic navýšen nad hodnotu excitačního výkonu. Q-switch je nezkřáceně označován jako quality switch. S rostoucí délkou pulzu klesá maximální výkon. Maximální výkon může být generován až v řádech GW (giga Watt). Pokud je Q-switch aktivní, nepropouští fotony a v aktivním prostředí probíhá buzení na větším množství elektronů a akumulaci výkonu do jednotlivých laserových pulzů při deaktivaci (otevření) Q-switchu. Q-switch je ve dvou variantách, aktivní je přímo řízen ovládacím napětím, pasivní je řízen přiváděným výkonem laseru. [27]



Obrázek 17: Funkce Q-switchu [27]

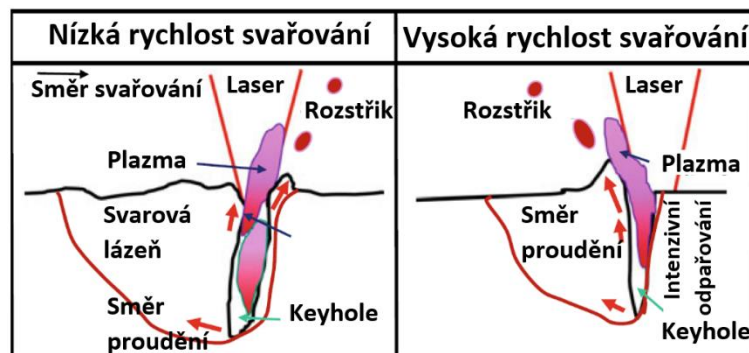
13. REŽIMY VYTVÁŘENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

13.1. Konduktivní svary

Svary s nízkou hloubkou průvaru, šířka svaru přesahuje jeho hloubku. Tepelně ovlivněná oblast dosahuje většího rozsahu než u svarů metody Keyholing. Obvykle se svary vyskytují při použití laserů o hustotě výkonu do $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a výkonu do 1 kW. V první fázi svařování je dopadajícím paprskem laseru natavena malá oblast materiálu, ze které se teplo přenáší kondukcí do okolí natavené oblasti, která se tímto rozšiřuje. Metoda se uplatňuje při svařování tenkých plechů do tloušťky 1 mm. [28]

13.2. Keyhole svary

Druh svarů s hlubokým průvarem a malou TOO. Podmínkou vzniku jevu je velmi vysoká hustota svařovacího výkonu. Svařovaný materiál je ohříván tak intenzivně, že nedochází pouze k jeho tavení, ale také k odpařování, při kterém vzniká paroplynný kanál (tzv. Keyhole) vytlačující taveninu svaru na povrch. Vzniklý paroplynný kanál zvyšuje koeficient absorpitivity dopadajícího laserového paprsku, a tím také energetickou účinnost svařování. Při dostatečné hustotě výkonu a při pohybu laserového svazku se spodní část kanálu začne uzavírat působením sil povrchového napětí (tavenina se slévá a po ztuhnutí vytvoří svarový spoj i bez použití PM). Metoda se vyznačuje vysokou svařovací rychlostí a také minimální deformací svařenců. [7]



Obrázek 18: Vizualizace svařovací metody Keyhole [7]

14. DRUHY SVARŮ

14.1. Bodové svary

Lokálně provedené svary, rozměr šířky i délky svaru je totožný. Vhodné pro méně namáhané aplikace, pevnost svarového spoje je omezena jeho velikostí. Svar může být proveden konduktivním svařováním, stejně jako metodou svařování průchozím paprskem, tzv. „Keyholing“. Pevnost hluboce penetrovaných bodových svarů (Keyholing) je negativně ovlivněna jejich poretitou vznikající při kolapsu paroplynnového kanálu z důvodu rapidního ústupu svařovacího výkonu při ukončení daného svařovacího pulzu. Kvalita bodových svarů může být zvýšena při optimalizaci průběhu svařovacího výkonu. Pro redukci, či případnou eliminaci rozstříku a poretity svaru je důležité zajistit postupný nástup a pokles svařovacího výkonu. Pozvolný nástup svařovacího

výkonu redukuje rozstřík svaru a pozvolný pokles výkonu redukuje vznik porozity svaru. [7]

14.2. Kontinuální svary

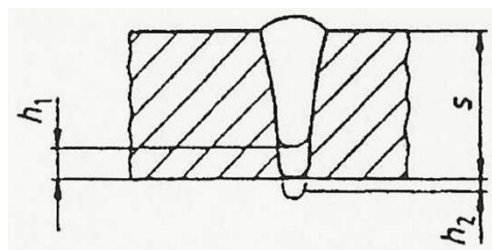
Svary s délkou násobně převyšující jeho šířku. Svary jsou vhodné pro pevnostní aplikace, umožňují zajištění těsnosti svaru. Obvykle jsou vytvářeny při konstantních provozních parametrech umožňujících stabilizaci svařovacího procesu.

15. VADY SVARŮ

Při jakémkoli způsobu svařování dochází ke vzniku vad svarů, které negativně ovlivňují vlastnosti svarového spoje, jako jsou např. jeho pevnost, pružnost a korozivzdornost. Charakter a četnost vad je dán zvolenou svařovací technologií, přípustná mez výskytu vad bývá stanovena na základě požadavků kladených na výsledný produkt. Vady svarových spojů jsou obecně rozděleny a klasifikovány v evropské normě EN ISO 6520 (Klasifikace geometrických vad kovových materiálů) [29]. Vyhodnocení pro různé stupně kvality laserových svarů při svařování ocelí se provádí podle normy EN ISO 13919-1 (Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Požadavky a doporučení pro určování stupňů jakosti). Nejčastější vady laserových svarů jsou dále detailněji rozebrány v kapitole 14.1.

15.1. Neprovařený kořen (označení podle EN ISO 6520 jako vada č. 402)

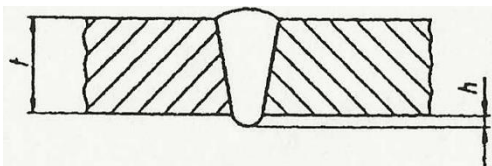
Vada svaru způsobená nedostatečným svařovacím výkonem, laserový paprsek nemá dostatek energie pro natavení materiálu v celé jeho tloušťce. Defekt se může vyskytovat i v případě lineárního přesazení svařovaných hran. Opakující se vada svaru detekovaná v průběhu výroby testovacích vzorků této bakalářské práce.



Obrázek 19: Podoba řezu svaru s neprovařeným kořenem [29]

15.2. Nadměrně propadlý kořen (EN ISO 6520 - 504)

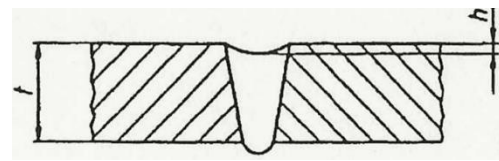
Vada svaru způsobena nadměrně vysokým svařovacím výkonem, svařovaný materiál je roztaven v takové míře, že se vlivem působení gravitační síly propadá pod svařovaný materiál.



Obrázek 20: Podoba řezu svaru s nadměrně propadlým kořenem [29]

15.3. Prohloubený povrch svaru (EN ISO 6520 - 511)

Obvyklý jev vyskytující se u svarů vytvořených bez použití přídavného materiálu, prohloubený povrch svaru je způsobem hned několika faktory a) působením gravitace a celkovým poklesem svaru b) odpařením části svarové lázně c) rozstříkáním svarové lázně do okolí. Minimalizovat prohloubení lze optimalizací svařovacího výkonu, pozicí svařovacího ohniska a šířkou svaru. Kompensace prohloubení povrchu svaru může být zajištěna i použitím přídavného materiálu, nicméně tato možnost nesplňuje zadávací požadavky bakalářské práce.

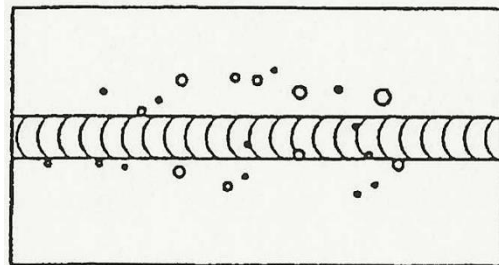


Obrázek 21: Podoba řezu svaru s prohloubeným povrchem [29]

15.4. Rozstřík (EN ISO 6520 - 602)

Jedná se o částičky svarové lázně rozseté po povrchu dílu v okolí svaru. Je považován za nežádoucí z pohledu mechanických i vizuálních vlastností svařenců. V závislosti na důležitosti potlačení jevu rozstříku jsou aplikovány opatření pro jeho minimalizaci. Nejčastěji se rozstřík svaru vyskytuje při vysokorychlostním svařování, při kterém působí na svařovaný materiál rychlé změny teplot. Intenzivní rozstřík svarů vede k nedostatku materiálu v místě svaru. [9]

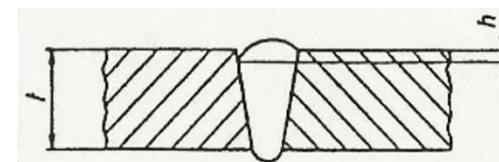
Rozstřík vzniká při vysokých svařovacích rychlostech, vysokém výkonu a pozici ohniska svařovacího paprsku na povrchu materiálu. V okolí „klíčové dírky“ je materiál intenzivně ohříván a zároveň vytlačován plyny unikajícími z paroplyného kanálu. V souvislosti na kombinaci těchto dvou faktorů dochází k rozstříku materiálu do okolí svaru. V případě rozostření svařovacího paprsku je snížena intenzita ohřevu materiálu ohřevu klíčové dírky, díky čemuž není materiál tak intenzivně rozstříkáván do okolí. [7]



Obrázek 22: Podoba povrchu svaru s rozstříkem [29]

15.5. Zápal (EN ISO 6520 - 5011)

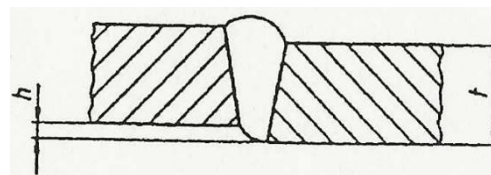
Propadnutí okraje svaru vůči svařovanému materiálu, bývá pozorováno nejčastěji u širokých svarů prováděných při vysokovýkonném svařování, dále se také vyskytuje při aplikaci velkých průtoků plynu ochranné atmosféry v přední části svaru. Zápal způsobuje zmenšení nosného průřezu svařence. Vzniká vrub v těsné blízkosti svarové housenky, který je nutné zohlednit při pevnostních výpočtech a následném dimenzování svarů a dílů.



Obrázek 23: Podoba řezu svaru se zápalem [29]

15.6. Lineární přesazení (EN ISO 6520 - 507)

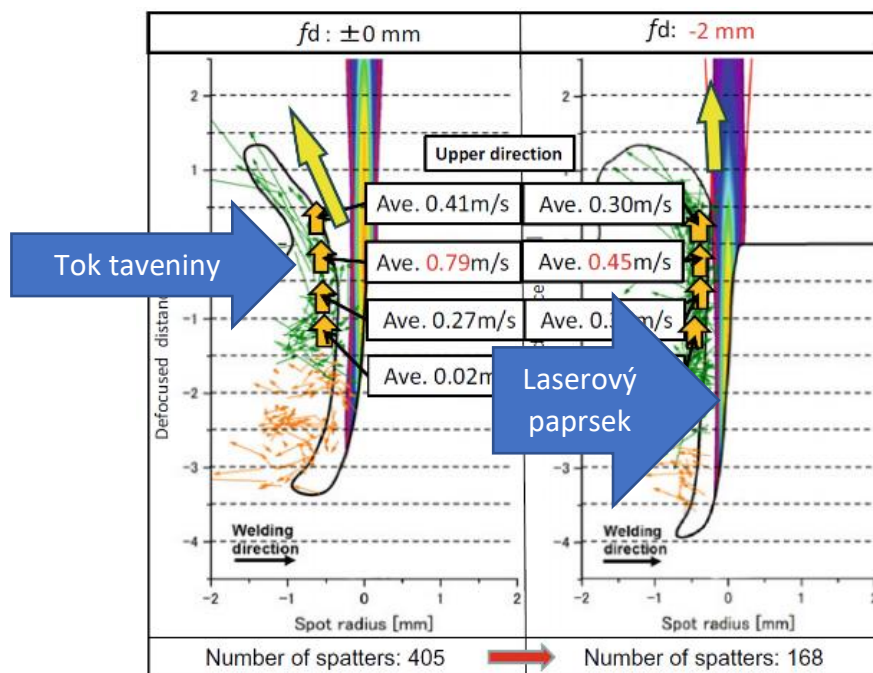
Výsledek špatného pozicování svařovaných dílů (resp. svařových ploch) materiálu před procesem svařování. V některých případech může být lineární přesazení způsobeno také zkroucením svařence vlivem tepleného namáhání svařováním v bezprostřední blízkosti daného místa.



Obrázek 24: Podoba řezu svaru s lineárním přesazením [29]

15.7. Humping

Humping pojmenovává jev „vytlačení materiálu svaru nad svařovaný povrch“. Vyskytuje se pouze u úzkých svarů s vysokou intenzitou svařovacího paprsku a nedefokusem ohniskem. Vytlačení materiálu zadní části klíčové díry (vyznačeno v obr. 25 žlutými šipkami) je způsobeno unikajícími plyny z otvoru. [7] Jedná se o vadu neuvedenou v normě EN ISO 6520.



Obrázek 2510: Porovnání vlivu defokuse paprsku na podobu svarové lázně [7]

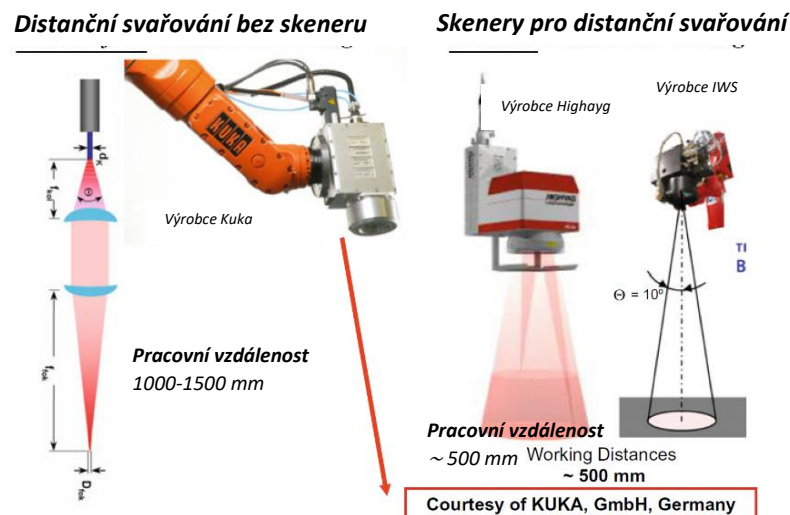
16. VHODNOST TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ PRO PRŮMYSL

Technologie laserového svařování je vhodná zejména pro aplikace v sériové výrobě s vysokými nároky na přesnost a opakovatelnost. Z dlouhodobého hlediska se jedná o finančně výhodnou variantu svařovací technologie díky nízkým energetickým nárokům. Pro zajištění výhodnosti této technologie vůči konvenčním metodám je nezbytně nutná vysoko sériová výroba pro kompenzaci vysokých pořizovacích a servisních nákladů svařovacích laserů včetně doprovodného příslušenství, které je nejdražší mezi komerčně používanými svařovacími technologiemi.

Mezi nevýhody laserového svařování patří potřeba zajištění stabilní pozice svarových ploch, případně online navádění na pohybující se svařovanou oblast. Laserové svařování vykazuje vysoké nároky na kvalifikovanost servisních pracovníků. Svařovací zdroje a příslušenství je vysoce citlivé na správnou manipulaci a čistotu prostředí vnitřních komponent.

17. DISTANČNÍ SVAŘOVÁNÍ (Remote welding)

Způsob svařování, při kterém je vzdálenost mezi optickou svařovací hlavou a svařovaným místem více než 500 mm. Obvykle se jedná o aplikace, pro které by standardní fokusační vzdálenost nebylo vhodné aplikovat z prostorových důvodů. Distanční svařování je výhodně používáno při montáži svařovací hlavy na průmyslové roboty, které manipulují se svařovací hlavou a určují místo svaření. Korekce vzájemné pozice je možné provést za pomoci měřících skenerů, čímž je zajištěno dodržení správného místa svařování včetně pozice svařovacího ohniska. [7,30]



Obrázek 2611: Příklady distančního svařování s a bez skeneru [7]

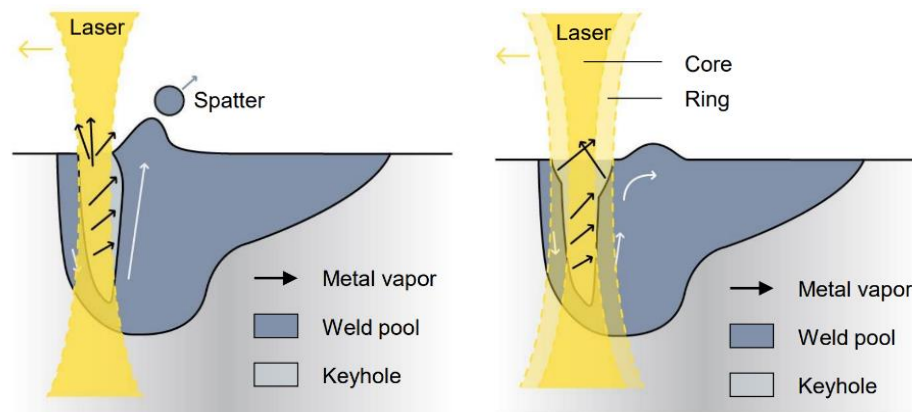
18. SVAŘOVÁNÍ VÍCEPAPRSKOVÝM ZDROJEM

Vícepaprskové svařování je metoda vyvinutá pro minimalizaci vad svaru při zachování či dokonce navýšení průvaru svaru.

Paprsky jsou obvykle situovány vedle sebe, za sebou či soustředně. Jako příklad je možné uvést ARM laserový mód, při kterém je svařovací paprsek rozdělen na vnitřní paprsek s vnějším kroužkem (viz obr. 28). Použití dvojitého paprsku umožňuje zvětšení hloubky svaru při zachování původního výkonu aplikovaného do samostatného paprsku. Zvýšení hloubky penetrace je dosaženo zařazením dvou paprsků za sebou ve směru svařování, silnější paprsek je řazen za paprsek předcházející. [7]

18.1. Svařování více paprskovým zdrojem stejné vlnové délky – metoda ARM

Svařování dvojitým paprskem stejné vlnové délky s rozdílnou intenzitou paprsku v jádře (tzv. Core) a v prstenci (tzv. Ring). Vnější část paprsku slouží zejména pro dosažení požadované kvality povrchu svaru (rozstřík - spatter, propadnutí atp.), zatímco jádro slouží k maximalizaci hloubky provaření. Díky rozdělení paprsku jsme schopni dosáhnout stejné hloubky provaření při sníženém výkonu jako jednopaprskovým zdrojem (viz obr. 27). Narozdíl od jednopaprskových aplikací nebývá nutná defokusace paprsku pro dosažení potřebné kvality povrchu. Svařovací zdroj může být díky stejné vlnové délce obou paprsků pouze jeden.

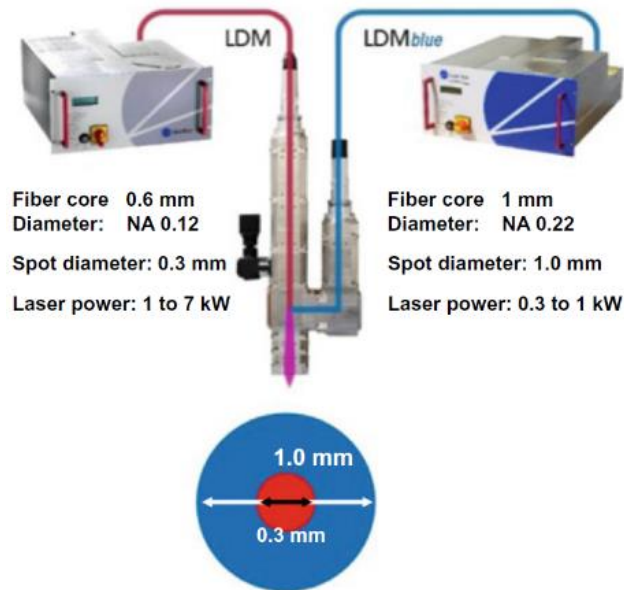


Obrázek 27: Schéma svařování jednopaprskovým laserovým zdrojem [31]

Obrázek 28: Schéma svařování vícepaprskovým laserovým zdrojem [31]

18.2. Svařování více paprskovým zdrojem o různých vlnových délkách

Kombinace dvou laserových paprsků působících v jednom místě s rozdělenou funkcí. První paprsek o vlnové délce 1064 nm taví povrch materiálu, zatímco druhý paprsek o vlnové délce 532 nm zajišťuje vysokou hodnotu hloubky svaru z již nataveného povrchu se sníženou odrazivostí paprsku. Samostatné použití paprsku o vlnové délce 532 nm není vhodné z důvodu zhoršené absorpce energie svařovacího laseru nepředtaveným materiálem. [7]



Obrázek 29: Vizualizace kombinace svařovacích zdrojů různé vlnové délky [7]

<p>SHG YAG laser ($\lambda = 532 \text{ nm}$)</p>	<p>A5083, Bead-on-plate welding Coaxial optics system</p> <p>Pulsed YAG laser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) : $P_0 = 5.5 \text{ kW}$, $P_a = 275 \text{ W}$</p> <p>SHG YAG laser ($\lambda = 532 \text{ nm}$) : $f = 10 \text{ kHz}$, $P_a = 40 \text{ W}$</p> <p>$v = 0.6 \text{ mm/s}$, $f_d = 0 \text{ mm}$ ($f = 100 \text{ mm}$) Shielding gas : N_2 (30 ℓ/min)</p>		
<p>Pulsed YAG laser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)</p>			
<p>$\tau = 1 \text{ ms}$ $f = 50 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 2 \text{ ms}$ $f = 25 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 5 \text{ ms}$ $f = 10 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 10 \text{ ms}$ $f = 5 \text{ Hz}$</p>
<p>↓ ↓ ↓ ↓</p>			
<p>Combination of pulsed YAG laser & SHG YAG laser</p>			
<p>$\tau = 1 \text{ ms}$ $f = 50 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 2 \text{ ms}$ $f = 25 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 5 \text{ ms}$ $f = 10 \text{ Hz}$</p>	<p>$\tau = 10 \text{ ms}$ $f = 5 \text{ Hz}$</p>

Obrázek 30: Porovnání svarů při použití dvojitého laserového paprsku odlišné vlnové délky [7]

19. KONTROLA KVALITY SVAŘOVACÍHO PROCESU

Kontrola svařovacího procesu může být prováděna v různých fázích výroby. Jedním ze základních rozdělení kontrol je rozdělení časové, tedy rozdělení dle toho, jestli se jedná kontrolu před svařováním, při svařování nebo až po něm. Kontrolní parametry se odvíjejí od dané výrobní fáze procesu.

19.1. Předprocesní kontrola

Kontrola prováděná před svařováním za účelem optimalizace vstupních parametrů. Může se jednat o kontrolu chemického složení, kontrolu geometrie svarových ploch, poziční kontrolu atp. Kontroly mohou být prováděny automatizovaně nebo za použití lidských zdrojů. S rostoucí mírou četnosti kontrol roste množství jejich automatizace. Mezi nejčastěji automatizované kontroly patří kontrola horizontální a vertikální pozice svarových ploch s nebo bez online propojení s poziční korekcí svařovacího paprsku. Poziční korekce slouží k zajištění přesné osové pozice paprsku vůči svarové mezeře. Vykutují se také případy bez poziční korekce sloužící pouze ke statistickému vyhodnocení stability. Technické řešení kontroly pozice jsou: optické systémy (2D skenery, kamery...), dotykové sondy, odvalovací snímače.

19.2. Procesní kontrola

Sledovací mechanismy důležitých parametrů v průběhu samotného svařování, v závislosti na nastavení zařízení mohou a nemusejí být propojeny s online korekcí řídicích parametrů technologie. Mezi sledované parametry standardně řadíme intenzitu odraženého paprsku, vyzářené světlo, spektroskopii plasmu, svařovací teplotu a velikost svarové lázně.

19.3. Poprocesní kontrola

Analýzy kvality hotového svarového spoje, obvykle hodnotíme vnitřní strukturu i povrch svaru. Pro kritické aplikace jsou požadovány povinně na 100% produkce (např. tlakových nádobách). V souvislosti na finálním použití produktu jsou svary podrobovány:

- a) online kontrole přímo ve výrobním zařízení
- b) zpětné kontrole na speciálním pracovišti kontroly

Kontroly povrchových vad mohou být prováděny pomocí NDT zkoušek vizuálně (VT), kapilární zkouškou (PT) či magnetickou zkouškou (MT). Kontroly vnitřních vad jsou analyzovány za pomoci NDT metod: vířivých proudů (ET), ultrazvukové zkoušky (UT), zkoušky prozářením (RT) nebo pomocí destruktivních zkoušek: kontrolních řezů (metalografické analýzy) a mechanických zkoušek.

Detailnější rozklad zkoušek svarů není z důvodu rozsahu a zaměření práce uveden, doplňující informace lze nalézt např. v knize Bernarda Kopce s titulem Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, ISBN: 978-80-7204-591-4.

20. ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je nejen představení problematiky laserového svařování, ale také rozbor vhodné technologické konfigurace laserového svařovacího zdroje a jeho komponent pro konkrétní průmyslovou aplikaci. V mém případě je zadaným úkolem volba určená pro svařování korozivzdorné pásky z materiálu EN 1.4509 o tloušťce 1,2mm a svařovací rychlosti $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Kvalitativními požadavky je dodržení provaření celé tloušťky materiálu, minimalizace vrubů na přechodu svaru a základního materiálu, odstranění rozstříku svarového kovu a minimalizace potřebného výkonu svařovacího zdroje.

21. NÁVRH EXPERIMENTU

21.1. Návrh komponent k testování

Na základě produktových a procesních požadavků byla za účelem testování vhodné konfigurace svařovacího zdroje a jeho komponent zvolena sestava s dostatečnou výkonovou rezervou pro případ nesplnění očekávaných výsledků a umožnění pokračování testování bez nutnosti změny testovacího zařízení. Na základě výsledků z testování bude provedena přesná specifikace komponent pro následné osazení do výrobní linky, tentokrát již bez výrazných výkonových rezerv.

Produktové a procesní požadavky:

- Schopnost vysokorychlostního svařování (cíleno na $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)
- Minimalizace vrubů na přechodu svaru a základního materiálu
- Provaření celé tloušťky materiálu (tl. 1,2 mm)
- Eliminace rozstříku svaru
- Minimalizace svařovacího výkonu
- Výkonová stabilita při dlouhodobém zatížení

Na základě uvedených požadavků byly k testování navrženy následující parametry:

- Požadovaný výkon laserového zdroje: 8 kW
- Optické vlákno umožňující svařování ARM metodou
 - Velikost stopy dopadu: 100/400 μm
 - Velikost stopy dopadu: 200/700 μm
 - Druhé optické vlákno pro porovnání vlivu velikosti svařovacího spotu a intenzity laserového paprsku

Na základě uvedených parametrů byla zvolena následující testovací konfigurace laserového zařízení:

- Laserový svařovací zdroj: Trumpf TruDisk 8001
- Optické vlákno: Bright line 2in1 LLK
 - Velikost stopy dopadu: 100/400 μm
 - Velikost stopy dopadu: 200/700 μm
- Optická hlava: BEO D50

Zvolené komponenty byly za účelem testování zapůjčeny v testovacím středisku společnosti Trumpf, včetně proškoleného pracovníka obsluhy zařízení. Jelikož se jednalo o testování a nebylo možné svařovací zařízení osadit do zatím neexistující výrobní linky, byly komponenty osazeny do svařovací buňky TruLaser Cell 7040, umožňující potřebné polohování optické svařovací hlavy vůči pevně uloženému upínacímu přípravku pro držení pásky ke svařování. Svařovací buňka dále zastala funkci distribuce ochranné atmosféry argonu zabraňující vzniku nežádoucí oxidace svarů.

21.2. Návrh přípravy svařovaných vzorků

Jak již bylo uvedeno, svařování testovacích vzorků probíhalo v upínacím přípravku, ve kterém byly vždy upnuty dvě pásky přitlačené k sobě. Upínání bylo zajištěno ručními rychloupínkami, samostatnými pro každou stranu přípravku a jeden díl pásky. Oblast svarové mezery se nacházela v odlehčené části přípravku (viz obr. 31) tak, aby bylo umožněno svařování bez styku s přípravkem. Zarovnání svarové mezery bylo prováděno vůči výsuvnému dorazu, ke kterému byla doražena jedna z pásek a poté zafixována. Druhá páska byla po zasunutí dorazu dotlačena k hraně pásky první, poté byla také upnuta. K přesnému polohování sloužily přitlačné šrouby a rozpěrná lišta (viz obr. 32) na obou stranách přípravku. Výměna pásky byla prováděna ručně včetně orientace sražených hran na horní stranu.

Ocelová páska byla nadělena na kusy o délce 400 mm, vstupní páska je rozdělena do 3 kategorií dle přípravy hran (s rozdílným úhlem zkosení svarové plochy):

1. Úkos svarové plochy 0°
2. Úkos svarové plochy $2,5^\circ$
3. Úkos svarové plochy 5°

21.3. Návrh vyhodnocení

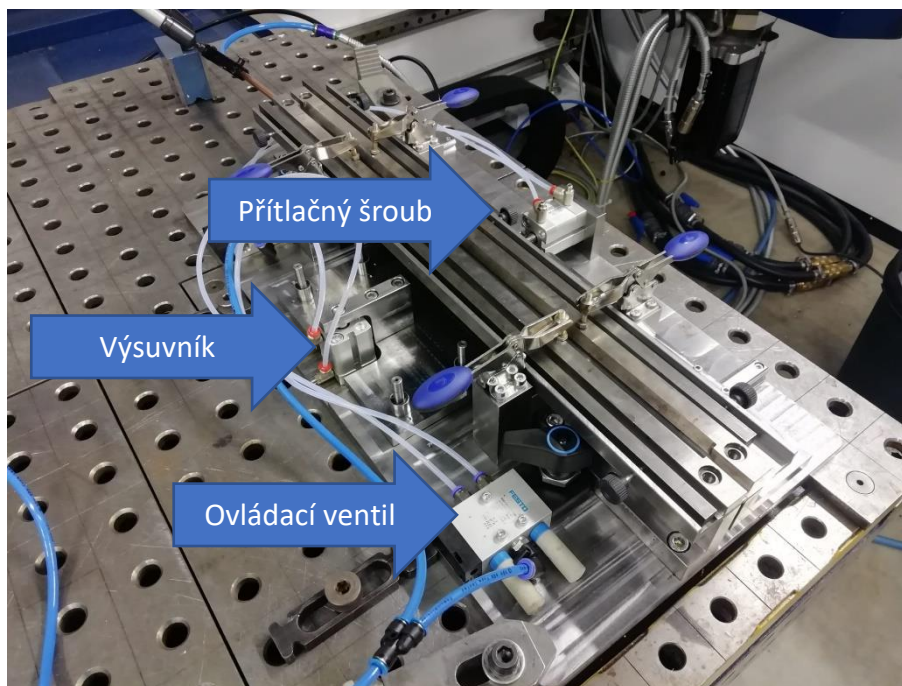
Vyhodnocení kvality svaření a splnění procesních parametrů bylo navrženo v několika níže uvedených krocích:

1. Základní vyhodnocení
 - a. Vizuální kontrola (pomocí zvětšovacího skla se zvětšením 5x)
 - b. Výběr nejlepších vzorků pro další laboratorní analýzy
2. Laboratorní vyhodnocení
 - a. Metalografické vyhodnocení makroskopické zkoušky (kontrola úkosů svarových ploch určených ke svařování + kontrola vybraných svarových spojů)
 - b. Metalografické vyhodnocení mikrostruktury jednotlivých oblastí svarového spoje
 - c. Změření geometrických parametrů svarového spoje (na makrostrukturním vzorku)
3. Vyhodnocení získaných výsledků

22. POSTUP EXPERIMENTU

22.1. Postup testování varianta č.1 – optické vlákno 100/400 μ m

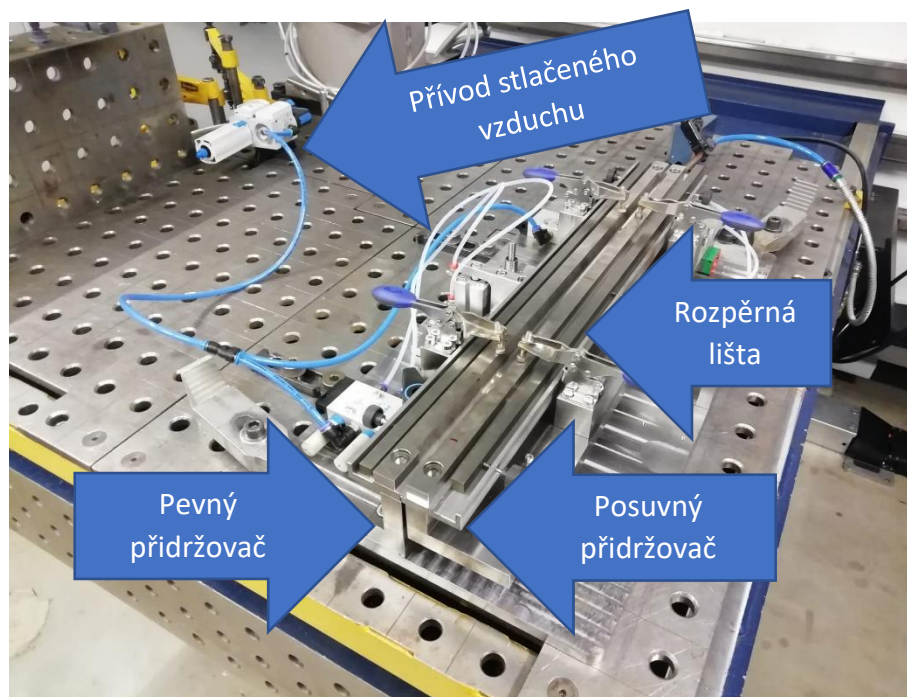
V prvním kroku testování bylo provedeno upnutí přípravku a prvních testovacích pásek (zkušebních vzorků) ke svaření, předběžné nastavení pozice distributoru ochranné atmosféry a zaměření pozice svarové mezery. Distributor ochranné atmosféry argonu je připevněn na lineárním vedení optické hlavy zařízení TruLaser Cell 7040. Ovládání procesu probíhá CNC kódem z ovládacího pultu vně svařovací buňky.



Obrázek 1231: Celkový pohled na testovací přípravku levý

V druhém kroku proběhla tvorba jednoduchého programu pro ovládání svařovacího laseru včetně jeho pohybu předepsaného umístěním svařovací mezery. Pohyb optické hlavy byl zajištěn lineárním vedením svařovací buňky, na kterém byla optická hlava umístěna, pozice svařovacího stolu byla pevná.

Ve třetím kroku proběhlo osm svařovacích sekvencí pro předběžné nastavení procesních parametrů na základě vizuální kontroly pod zvětšovacím sklem se zvětšením 5x. Dále již probíhaly pouze korekce přesného nastavení a pozorování vlivu změny úhlu zkosení svarové plochy na vstupních páskách.



Obrázek 32: Celkový pohled na testovací přípravek pravý

Celkem bylo svařeno 50 vzorků, 4 nejlepší vzorky na základě vizuální kontroly byly určeny k další laboratorní analýze, použité procesní parametry vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce č.5.

- 22.2. Postup testování varianta č.2 – optické vlákno 200/700 μ m
 Rozdíl mezi první a druhou fází testování byl pouze v použití většího optického vlákna při zachování veškerých ostatních komponent v původní konfiguraci, díky tomu mohly být vynechány první tři kroky z první fáze testování určené pro základní ustavení přípravku a nastavení zařízení. Pokračovalo se pouze finální fází postupných korekcí nastavení a pozorování jejich vlivu.

Celkem bylo provedeno 40 vzorků, 6 nejlepších vzorků na základě vizuální kontroly bylo použito k další laboratorní analýze, použité procesní parametry vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce č.5.



Obrázek 33: Čelní pohled na testovací přípravek se vzorkem

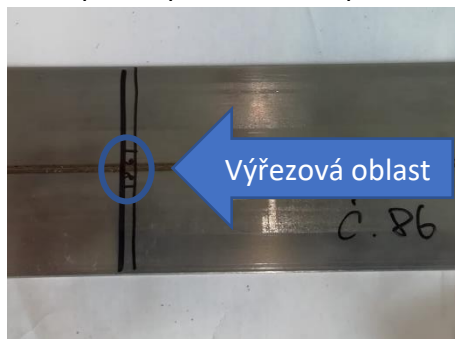


Obrázek 34: Svařovací štěrba v přípravku

22.3. Postup laboratorního vyhodnocení

22.3.1. Postup laboratorní přípravy metalografických vzorků

Veškeré přípravné procesy vzorků byly stanoveny na základě potřeb následného procesu vyhodnocování vzorků na metalografickém mikroskopu. Přípravě vzorků předcházelo vyřezání předem označené části



Obrázek 35: Označení vzorku pro dělení



Obrázek 3613: Metalografická pila Struers Labotom



Obrázek 37: Metalografický lis Cito Press



Obrázek 38: Metalografická bruska Beuhler Beta

svaru z dvojice svařených pásek (viz obr.35). Dělení vzorků probíhalo za intenzivního chlazení řeznou emulzí na metalografické pile Struers Labotom 63. Po procesu dělení následovalo zpracování vzorků na metalografickém lisu Struers Cito press. K lisování bylo využito fenolové pryskyřice MultiFast, do které byly vzorky zalisovány a následně metalograficky zpracovány (broušeny, leštěny a leptány) a vyhodnoceny. Následujícím krokem bylo tedy postupné broušení a leštění čelní plochy vzorků na metalografické brusce a leštičce Buehler Beta s automatickou hlavou Vektor. Broušení bylo provedeno v odstupňovaných krocích, kterými jsou: broušení brusnými papíry zrnitosti 180, 1200, 2000, a poté leštění brusnou pastou Masterprep o zrnitosti $1\mu\text{m}$ a $0,05\mu\text{m}$. Posledním krokem přípravy vzorků bylo leptání struktury na hranici zrn (leptáno směsí jednoho dílu kyseliny dusičné a třech dílů kyseliny chlorovodíkové).

22.3.2. Postup laboratorního vyhodnocení vzorků

Vyhodnocení vzorků bylo provedeno na digitálním mikroskopu Carl Zeiss Axio Observer D1m. Výbrusy svarových ploch pásky byly pozorovány se zvětšením 25x, výbrusy svarů se zvětšením 50x a struktura svarových spojů byla pozorována se zvětšením 200x.

23. VÝSLEDKY VYHODNOCENÍ

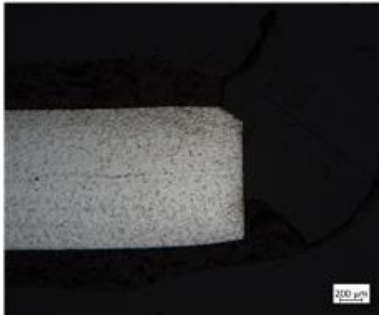
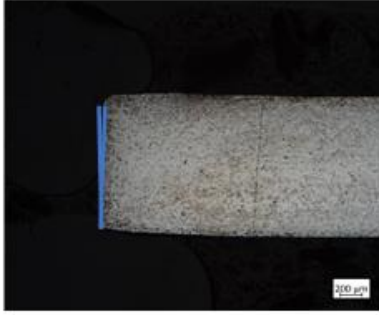

23.1. Výsledky hodnocení svarových ploch pásky

Ohledání bylo provedeno na referenčním vzorku od každého nastavení úhlu svarových ploch pásky. Na všech zkoumaných vzorcích bylo nalezeno několik společných charakteristik, kterými jsou: částečné zakřivení pásky v celé šíři, jemná struktura zrna odpovídající nepostižení materiálu tepelným zpracováním (např. žíhání vedoucí ke zhrubnutí zrna), nepřítomnost textury po formování za studena a sražení hrany na jedné ze stran. Úhel zkosení hran pásky odpovídal předepsané hodnotě s tolerancí $\pm 0,25^\circ$. Hodnoty byly měřeny jako úhel mezi hranou pásky a kolmicí k spodní hraně pásky, viz modré označení v tab. č. 4



Obrázek 39: Metalografický mikroskop Zeiss Axio Observer D1m

Tabulka 4: Přehled výbrusů nastavení hrany pásky

Úhel hrany pásky	Výbrus
0°	
2,5°	
5°	

23.2. Výsledky ohledání výbrusů svaru

Číslování vzorků odpovídá pořadovému číslu provedeného testu, z důvodu výběru nejkvalitnějších svarů (na základě vizuální zkoušky pod zvětšovací sklem se zvětšením 5x). Z uvedeného důvodu není označení uvedených vzorků postupnou číselnou řadou.

První fáze testování (spot 100/400 μm):

- Vzorek č. 8
 - Svar je proveden bezmála v plné tloušťce materiálu, prohloubení povrchu svaru vůči okolnímu materiálu dosahuje maximální hodnoty 40 μm , splňuje tedy hodnotu pro klasifikaci vysokým stupněm kvality. Vznik prohloubení povrchu svaru je s největší pravděpodobností způsoben pozorovaným rozstříkem svarové lázně, zkosením hran pásky a odpařením části svarové lázně. Vady vnitřní struktury svaru nebyly nalezeny. Textura zhrubnutého zrna odpovídá teplotnímu gradientu chladnutí. S ohledem na porovnání s ostatními vzorky lze říci, že příčinou rozstříku svarové lázně je svařování pouze prstencem bez participace svařování jádrem paprsku, a to navíc bez defokuse paprsku vedoucí k nadměrně vysoké intenzitě ohřevu povrchu svarové lázně a k její nestabilitě a následnému rozstříku do okolí.
- Vzorek č. 12
 - Vzorek vykazuje známky takřka plného provaření tloušťky materiálu, zejména lepší provaření v oblasti kořene svaru v porovnání se vzorkem č. 8, které je způsobeno efektivnějším rozdělením výkonu paprsku a využitím jádra paprsku s výkonovým poměrem 30%. Vyšší hloubka závaru ve spolupráci se zkosením hran a odpařením části svarové lázně však vede ke vzniku hlubšího prohloubení povrchové části svaru (63 μm), avšak stále splňující parametr maximální přípustné hodnoty pro klasifikaci vysokým stupněm jakosti (max. 120 μm). Svar je bez viditelných vnitřních vad, černé body na výbrusu jsou způsobeny znečištěním leptadlem (artefakty způsobené přípravou vzorku), které vyvzlínalo z mezery mezi sledovaným materiálem a fenylovou pryskyřicí, nejedná se tedy o vady svaru. Struktura a tvar svaru opakuje výsledek z předcházejícího vzorku.
- Vzorek č. 17
 - Na výbrusu je viditelné dosažení plné hloubky průvaru. V souvislosti se zvýšením svařovacího výkonu bylo dosaženo větší šířky kořene svaru (418 μm). Opakuje se charakteristika předcházejících svarů, tzn. zhrubnutí zrna v oblasti svaru, částečné prohloubení povrchu svaru (43 μm), textura odpovídající teplotnímu gradientu chladnutí s dělicí osou ve středu svaru. Volné kousky materiálu nacházející se pod svařeným vzorkem jsou s největší pravděpodobností zbytky otřepů po vstupním dělení materiálu a zalisování do okolí metalografického vzorku, pouze oddělené vlivem broušení v přípravné fázi vzorku. V celkovém porovnání se jedná o nejlepší dosažený výsledek svaření. Doporučení komponent a úvodního provozního

nastavení při průmyslové aplikaci se bude odvíjet zejména od tohoto vzorku a procesních parametrů s tímto vzorkem souvisejících.

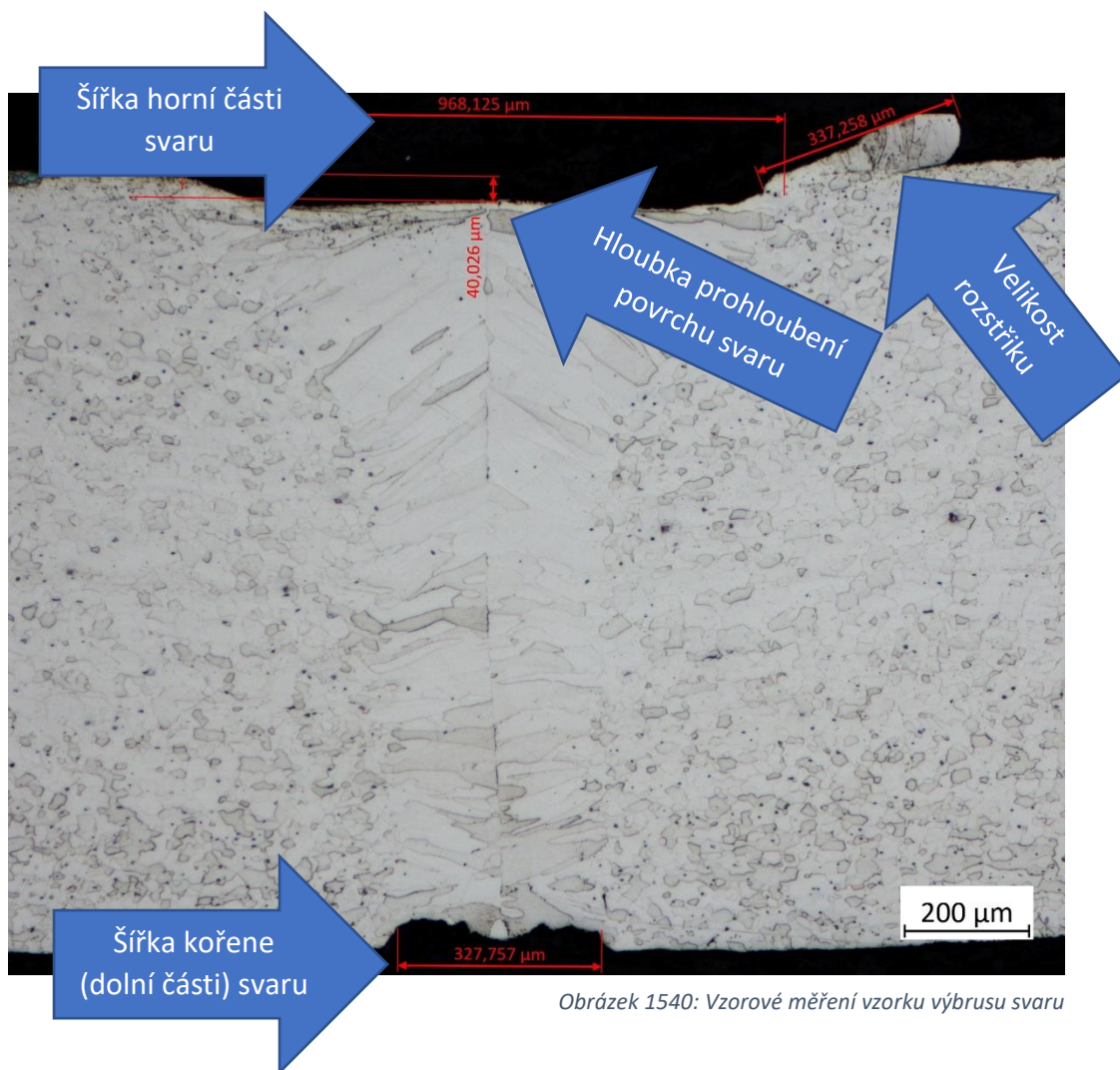
- Vzorek č. 23
 - Hloubka svaru dosahuje téměř celé tloušťky základního materiálu, snížení hloubky odpovídá redukcí svařovacího výkonu vůči vzorku č. 12 a 17. Prohloubení povrchu svaru je téměř rovinné bez středového převýšení. Čáry viditelné zejména v horní části výbrusu jsou zbylé stopy po přípravném procesu broušení. Opakuje se postupné zužování svaru s rostoucí vzdáleností od horní části svaru včetně podoby zrn svaru a jeho okolí. Volné kousky materiálu nacházející se pod svařeným vzorkem jsou s největší pravděpodobností zbytky otřepů po vstupním dělení materiálu.

Druhá fáze testování (spot 200/700 μm):

- Vzorek č. 78
 - První referenční vzorek k bližšímu zkoumání vybraný ze svařených pásek po změně optického vlákna na rozměr 200/700 μm . Hloubka svaru dosahuje spodní hrany materiálu, nicméně můžeme pozorovat masivní prohloubení povrchu svaru (162 μm) a výrazné zakřivení obou svařovaných pásek, s ohledem na svařovací metodu lze předpokládat, že zakřivení není způsobeno svařováním. V ose svaru došlo ke vzniku dendritických svislých zrn.
- Vzorek č. 82
 - Hloubka závaru je ovlivněna přesazením svarových ploch pásky, opakuje se výrazný prohloubený povrch svaru (139 μm – jakost střední). Ve středové oblasti horní poloviny svaru jsou viditelná svislá dendritická zrna struktury. Výbrus nese stopy broušení. Horní strana svaru je bodově znečištěna leptací kyselinou vyvzlínanou z mezery mezi svarem a pryskyřicí, ve které je vzorek zalisován.
- Vzorek č. 83
 - Referenční vzorek je provařen v celé své tloušťce. Kořen svaru je částečně proláklý pod svařované pásky, způsobuje však pouze zaoblené vruby na přechodu do základního materiálu. Svar nedisponuje svislými lamelárními zrny, dělicí osa zrn ve středu svaru je jasně viditelná. Prohloubení povrchu svaru dosahuje velikosti 50 μm . Opakuje se znečištění vzorku leptadlem.
- Vzorek č. 86
 - Přestože vůči předcházejícímu vzorku č. 83 došlo ke zvýšení svařovacího výkonu na 3,5kW, není z důvodu snížení poměru výkonu na jádru paprsku dosaženo požadovaného průvaru na obou stranách, šířka kořene svaru 109 μm je z pohledu stability a pevnosti svaru taktéž nedostačující. I přes vstupní přesazení pásek můžeme pozorovat částečný propad povrchové části svaru na obou stranách, který dosahuje hloubky až 28 μm . Přesazení pásek způsobuje na spodní straně ostrý vrub rizikový pro následné mechanické namáhání a za určitých podmínek může vést také ke vzniku kapilárního efektu.






- Vzorek č. 88
 - Hloubka svaru jednoznačně nedosahuje spodní hrany pásky, naměřená maximální hloubka svaru dosahuje 747 μm , tedy zhruba 60% tloušťky svařovaného materiálu. Provozní nastavení odpovídá vzorku č. 86 pouze s přerozdělením výkonu jádra a prstence v poměru 20/80 namísto 30/70, výsledek splňuje předpoklad poklesu hloubky závaru způsobené snížením výkonu jádra paprsku zajišťujícího právě provaření materiálu. Svar je bez vnitřních vad, na výbrusu se opět vyskytuje pouze vyvzlínané leptadlo (černé stopy) z mezery mezi materiálem a pryskyřicí, viditelné zejména ve spodní nesvařené části.
- Vzorek č.89
 - Provaření materiálu je provedeno do hloubky 1189 μm , tedy cca 90%. Prohloubení povrchu svaru je pozorovatelné pouze v levé části svaru (28 μm). Opakuje se částečně přesazení hran, pravděpodobně vedoucí k nesymetrickému propadnutí povrchu svaru. Měřená šířka horní části svaru je největší mezi všemi měřenými vzorky (1448 μm). Standardní charakteristika svaru i zbytku vzorku je zachována, jsou přítomna svislá dendritická zrna ve středové oblasti svaru.


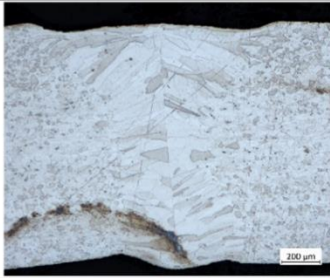



- Metodika měření výbrusů svaru
 - Na každém vzorku bylo realizováno uvedené měření (viz obr. 40):
 - Šířka horní části svaru (v kolmé ose vůči svislé ose svaru)
 - Šířka kořene resp. Dolní části svaru (v kolmé ose vůči svislé ose svaru)
 - Hloubka prohloubení povrchu svaru (měřeno rovnoběžně s hranou základního materiálu)
 - Velikost rozstříku (výskyt pouze na vzorku č.8) v nejdelším směru



Obrázek 1540: Vzorové měření vzorku výbrusu svaru

Tabulka 5: Přehled výbrusů svaru

Číslo vzorku	Výbrus svaru	Procesní parametry	Rozměry svaru:
8		Svařovací výkon [kW]: 2,5 Ohnisko [mm]: 0 Průměr optického vlákna [μm]: 100/400 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 0/100 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 30 Průtok argonu dolní [l/min]: 10	Šířka svaru [μm]: 968 Prohloubení svaru [μm]: 40 Šířka kořene svaru [μm]: 328 Velikost rozstříku [μm]: 337
12		Svařovací výkon [kW]: 2,5 Ohnisko [mm]: 0 Průměr optického vlákna [μm]: 100/400 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 35 Průtok argonu dolní [l/min]: 15	Šířka svaru [μm]: 1001 Prohloubení svaru [μm]: 63 Šířka kořene svaru [μm]: 387 Velikost rozstříku [μm]: 0
17		Svařovací výkon [kW]: 2,7 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [μm]: 100/400 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 35 Průtok argonu dolní [l/min]: 15	Šířka svaru [μm]: 1005 Prohloubení svaru [μm]: 43 Šířka kořene svaru [μm]: 418 Velikost rozstříku [μm]: 0
23		Svařovací výkon [kW]: 2,4 Ohnisko [mm]: 0 Průměr optického vlákna [μm]: 100/400 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 35 Průtok argonu dolní [l/min]: 15	Šířka svaru [μm]: 929 Prohloubení svaru [μm]: 48 Šířka kořene svaru [μm]: 484 Velikost rozstříku [μm]: 0
78		Svařovací výkon [kW]: 2,7 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [μm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 15	Šířka svaru [μm]: 1160 Prohloubení svaru [μm]: 162 Šířka kořene svaru [μm]: 333 Velikost rozstříku [μm]: 0

Číslo vzorku	Výburs svaru	Procesní parametry	Rozměry svaru:	
82		<p>Svařovací výkon [kW]: 3,2 Ohnisko [mm]: -1,2 Průměr optického vlákna [µm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 10</p>	<p>Šířka svaru [µm]: 1272 Prohloubení svaru [µm]: 139 Šířka kořene svaru [µm]: 283 Velikost rozstříku [µm]: 0</p>	
83		<p>Svařovací výkon [kW]: 3,2 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [µm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 50/50 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 10</p>	<p>Šířka svaru [µm]: 1267 Prohloubení svaru [µm]: 50 Šířka kořene svaru [µm]: 648 Velikost rozstříku [µm]: 0</p>	
86		<p>Svařovací výkon [kW]: 3,5 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [µm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 10</p>	<p>Šířka svaru [µm]: 1440 Prohloubení svaru [µm]: 28 Šířka kořene svaru [µm]: 109 Velikost rozstříku [µm]: 0</p>	
88		<p>Svařovací výkon [kW]: 3,5 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [µm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 20/80 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 10</p>	<p>Šířka svaru [µm]: 1372 Prohloubení svaru [µm]: 0 Šířka kořene svaru [µm]: 0 Velikost rozstříku [µm]: 0</p>	
89		<p>Svařovací výkon [kW]: 3,8 Ohnisko [mm]: -0,6 Průměr optického vlákna [µm]: 200/700 Poměr výkonu jádro / prsten [%]: 30/70 Svařovací rychlost [m/min]: 10 Úhel hrany pásky [°]: 0 Průtok argonu horní [l/min]: 10 Průtok argonu dolní [l/min]: 10</p>	<p>Šířka svaru [µm]: 1448 Prohloubení svaru [µm]: 28 Šířka kořene svaru [µm]: 286 Velikost rozstříku [µm]: 0</p>	

23.3. Výsledek vyhodnocení mikrostruktury

Zkoumání mikrostruktury materiálu, resp. Svarového spoje bylo realizováno při zvětšení 200x, vyhodnocení bylo provedeno na všech vzorcích s velice podobnými výsledky. Prezentované výstupy (viz tabulka č. 6) z mikroskopické analýzy proto budou provedeny pouze na vybraných reprezentativních vzorcích rozdělených dle zkoumané oblasti.

V horní části svaru jsou jasně viditelná dendritická zrna o délce 100 až 200 μm orientovaná ve směru chladnutí svarové lázně.

Tabulka 6: Přehled struktury materiálu

Pozorovaná oblast	Výbrus
Struktura horní části svaru	
Struktura kořene svaru	
Struktura základního tepelně neovlivněného materiálu	
Struktura tepelně ovlivněné oblasti	

Na vzorcích svařovaných optickým vláknem 200/700 μm jsou přítomna i dendritická zrna ve svislém směru, nacházející se pouze v oblasti osy svaru. Ve struktuře se nacházejí pravděpodobně vměstky nitridu titanu (TiN) viditelné jako malé útvary žluté barvy.

V oblasti kořene svaru pokračuje výskyt dendritických zrn, s rostoucí vzdáleností od horní hrany materiálu klesá jejich velikost (délka 100 až 150 μm). V případě plného provaření materiálu jsou zrna orientována víceméně vodorovně, v případě nedostatečné hloubky svaru přechází natočení zrna postupně z jedné strany na stranu druhou.

Základní materiál s pravidelným zrnem o velikosti do 40 μm nenesou známky předcházejícího tváření za studena. Stejně jako ve svaru jsou zde viditelné pravděpodobně vměstky nitridu titanu (TiN) bez přítomnosti dalších nečistot a vad struktury.

Tepelně ovlivněná oblast svaru dosahuje šířky cca 60 μm , na výbrusech s menším zvětšením (50x) jsou proto i špatně viditelná. V porovnání s ostatními konvenčními metodami svařování (el. obloukem, el. odporem) je TOO výrazně menší což sebou nese výhody minimalizace negativního vlivu na strukturní i mechanické vlastnosti svařence.

24. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

V souladu se získanými výsledky vyhodnocení reprezentativních vzorků lze stanovit níže uvedený závěr:

Požadovaná svařovací rychlost přesahuje možnosti zvolené konfigurace, vzorky vyrobené při svařovací rychlosti $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byly vytrženy již při vstupní vizuální kontrole. Při dodržení požadovaných hodnotících parametrů, zejména tedy problematického parametru rozstřiku svaru bylo dosaženo maximální svařovací rychlosti $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jedním ze základních přínosů analýzy je potvrzení benefitu využití ARM svařovací metody, díky které se podařilo redukovat požadovaný výkon z původně předpokládaných jednopaprskových 3,4 kW na dvoupaprskových 2,7 kW. V případě akceptace redukované svařovací rychlosti lze doporučit testovanou svařovací konfiguraci, pouze s rozdílem slabšího laserového zdroje:

- Laserový diskový svařovací zdroj Trumpf TruDisk 3000
- Optická svařovací hlava Trumpf BEO D50
- Optické vlákno Trumpf LLK-D Bright line 100/400 μm

Doporučené procesní parametry odpovídají procesním parametrům, při kterých byl vyroben vzorek č. 17, tedy:

- Svařovací rychlost: $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
- Svařovací výkon: 2,7 kW
- Svařovací ohnisko: -0,6 mm
- Rozdělení výkonu paprsku jádro / prstenec: 30/70
- Distribuce horní ochranné atmosféry: $35 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- Distribuce dolní ochranné atmosféry: $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- Úhel nastavení hrany pásky: 0°

Při dodržení předepsaných doporučení lze předpokládat svařování bez makroskopických i mikroskopických vad, minimální velikost TOO a šířku svaru pohybující se okolo 1000 μm bez nadměrné oxidace povrchu horní i dolní části svaru.

25. Použité literární zdroje

[1] OCHODEK, Vladislav. *Vliv vícenásobné plastické deformace na svařitelnost ocelí*. Ostrava, 2020. Disertační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Školitel Prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

[2] ČSN EN 10020. *Definice a rozdělení ocelí*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001.

[3] Ocel vysoce legovaná. *Esterer Gießerei* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.esterer-giesserei.de/cz/technika-odlevani/ocel-vysoce-legovana/>

[4] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí*. Praha. Výuková prezentace. ČVUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie

[5] 1.4509, X2CRTINB18 – STAINLESS STEEL. *VIRGAMENT* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://virgamet.com/1-4509-x2crtinb18-aisi-441-uns-s43940-z3ctnb18-stainless-steel>

[6] PILOUS, Václav. Svařování konstrukcí z korozivzdorných ocelí ve shodě s ČSN EN 1011-3. *KONSTRUKCE* [online]. 10.12.2012 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarovani-konstrukci-z-korozivzdornych-oceli-ve-shode-s-csn-en-1011-3/>

[7] KATAYAMA, Seiji. *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Osaka, Japan: Springer, 2020. ISBN 978-981-15-7933-5.

[8] Emise a absorpce světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>

[9] SEMICONDUCTOR LASER PHYSICS. *FIBER OPTICS FOR SALE CO* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/semiconductor-laser-physics>

[10] Jak funguje laser - princip laseru. *SKUPINA ČEZ* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>

[11] KANNATEY-ASIBU, JR., Elijah. *PRINCIPLES OF LASER MATERIALS PROCESSING* [online]. 2009. New Jersey, Kanada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken [cit. 2022-07-24]. ISBN 978-0-470-17798-3.

[12] DURDA, Tomáš. *Lasery a jejich využití v civilním / vojenském letectví* [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127650.

Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Slavomír Vosecký

[13] Princip laseru. *Laser* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>

[14] Laser Beam Delivery by Fiber — A Primer. *COHERENT* [online]. 2019 [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: https://content.coherent.com/legacy-assets/literature/white_papers/COHR_whitepaper_Fiber_Delivery_Primer.pdf

- [15] M. STEEN, William a Jyortirmoy MAZUMDER. *Laser Material Processing* [online]. Čtvrté vydání. Londýn: Springer, 2010 [cit. 2022-07-19]. ISBN 978-1-84996-061-8.
- [16] Cross section of the focusing unit (laser processing head) including the sensor system. *Research Gate* [online]. [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-the-focusing-unit-laser-processing-head-including-the-sensor-system_fig1_317762794
- [17] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [18] KOLAŘÍK, Ladislav a Jan SUCHÁNEK. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí*. Praha, 2016. Dílčí odborná zpráva projektu TA04030714. ČVUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie
- [19] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *MEGA BLOG* [online]. [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [20] CHEMLNÍČKOVÁ, Hana. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací* [online]. Olomouc, 2012 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Chmelickova-Inovace_laserovych_tehnologii.pdf. Vzdělávací publikace. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [21] Rozdělení laserů. *Laserová a optická technologie pro průmysl a vědu* [online]. [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/#:~:text=Vl%C3%A1knov%C3%A9%20lasery%20%3A&text=Z%C3%A1kladem%20laseru%20je%20optick%C3%A9%20vl%C3%A1kno,u%20ostatn%C3%ADch%20typ%C5%AF%20se%20li%C5%A1%C3%AD>
- [22] Třetí generace diskových laserů. *MM PRŮMSYLOVÉ SPEKTRUM* [online]. 2009, [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru>
- [23] Diskový laser. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/
- [24] Carbon dioxide laser treatment. *DermNet NZ* [online]. Liverpool, 2016 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: [https://dermnetnz.org/topics/carbon-dioxide-laser-treatment#:~:text=What%20is%20a%20carbon%20dioxide,infrared%20spectrum%20\(10%2C600%20nm\)](https://dermnetnz.org/topics/carbon-dioxide-laser-treatment#:~:text=What%20is%20a%20carbon%20dioxide,infrared%20spectrum%20(10%2C600%20nm))
- [25] SERIÁL NA TÉMA LASERY – HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128#:~:text=Diskov%C3%BD%20laser,-Modern%C3%AD%20technologie%20vyv%C3%ADjen%C3%A1&text=Pou%C5%BEit%C3%AD%20je%20zejm%C3%A9na%20pro%20v%C3%BDkonov%C4%9B,%C5%BEivotnost%20ne%C5%BE%20u%20laser%C5%AF%20vl%C3%A1knov%C3%BDch>

- [26] DUŠEK, Jiří. Zelené a UV lasery. *MEAG BLOG* [online]. 23.3.2012 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [27] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064nm Infra red. *Leonardo technology automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [28] Heat conduction welding with an excellent welded seam. *Laserline* [online]. [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/heat-conduction-welding/#:~:text=The%20welding%20method,sheets%20with%20low%20material%20thickness>
- [29] Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel: ČSN EN ISO 13919-1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997.
- [30] BELFORTE, David. Remote welding. *LASER FOCUS WORLD* [online]. 2002 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14217022/remote-welding>
- [31] BrightLine Weld: Perfect welding results in record time. *TRUMPF* [online]. 2020 [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_CA/user_upload/TRUMPF_BrightLine_Weld.pdf

26. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schaefflerův konstituční diagram s vyznačenou pozicí zkoumané oceli [4].	15
Obrázek 2: Schéma vzniku laserového záření [12]	18
Obrázek 3: Znárodnění Rayleighovy vzdálenosti 2,5mm [7]	20
Obrázek 4: Znárodnění Rayleighovy vzdálenosti 4mm [7]	20
Obrázek 5: Princip distribuce záření optickým vláknem [15]	21
Obrázek 6: Schéma optické hlavy [16]	22
Obrázek 7: Schéma bočně buzeného YAG laseru [19]	25
Obrázek 8: Schéma zadobuzeného YAG laseru [19]	25
Obrázek 9: Schéma diodového laseru [20]	26
Obrázek 10: Schéma vláknového laseru [19]	26
Obrázek 11: Schéma diskového laseru [7]	27
Obrázek 12: Vizualizace diskového laseru Trumpf [23]	27
Obrázek 13: Schéma CO ₂ laseru [19]	28
Obrázek 14: Porovnání vlivu rozdílné kvality laserového paprsku (BPP) [7]	29
Obrázek 15: Závislost absorptivity na vlnové délce [7]	29
Obrázek 16: Rozdělení elektromagnetického záření dle vlnové délky [26]	30
Obrázek 17: Funkce Q-switche [18]	31
Obrázek 18: Vizualizace svařovací metody Keyhole [7]	32
Obrázek 19: Podoba řezu svaru s neprovařeným kořenem [29]	33
Obrázek 20: Podoba řezu svaru s nadměrně propadlým kořenem [29]	33
Obrázek 21: Podoba řezu svaru s prohloubeným povrchem [29]	34
Obrázek 22: Podoba povrchu svaru s rozstříkem [29]	34
Obrázek 23: Podoba řezu svaru se zápalem [29]	34
Obrázek 24: Podoba řezu svaru s lineárním přesazením [29]	35
Obrázek 25: Porovnání vlivu defokuse paprsku na podobu svarové lázně [7]	35
Obrázek 26: Příklady distančního svařování s a bez skeneru [7]	36
Obrázek 27: Schéma svařování jednopaprskovým laserovým zdrojem [31]	37
Obrázek 28: Schéma svařování vícepaprskovým laserovým zdrojem [31]	37
Obrázek 29: Vizualizace kombinace svařovacích zdrojů různé vlnové délky [7]	38
Obrázek 30: Porovnání svarů při použití dvojitého laserového paprsku odlišné vlnové délky [7]	38
Obrázek 31: Celkový pohled na testovací přípravek levý	42
Obrázek 32: Celkový pohled na testovací přípravek pravý	43
Obrázek 33: Čelní pohled na testovací přípravek se vzorkem	43
Obrázek 34: Svařovací štěrbinu v přípravku	43
Obrázek 35: Označení vzorku pro dělení	44
Obrázek 36: Metalografická pila Struers Labotom 6	44
Obrázek 37: Metalografický lis Cito Press	44
Obrázek 38: Metalografická bruska Beuhler Beta	44
Obrázek 39: Metalografický mikroskop Zeiss Axio Observer D1m	45
Obrázek 40: Vzorové měření vzorku výbrusu svaru	49

27. Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení testovaného materiálu DIN 1.4509 [5]	15
Tabulka 2: Porovnání vlnových délek laserů [7]	29
Tabulka 3: Porovnání účinnosti laserových zdrojů [9]	30
Tabulka 4: Přehled výbrusů nastavení hrany pásky.....	45
Tabulka 5: Přehled výbrusů svaru	50
Tabulka 6: Přehled struktury materiálu	52