



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ZÁVISLOST GEOMETRIE VNITŘNÍHO KOUTOVÉHO
SVARU PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ S ROZMÍTÁNÍM
SVAZKU U KOROZIVZDORNÉ OCELI**

DEPENDENCE OF FILLET WELD SEAM GEOMETRY IN LASER WELDING WITH WOBBLING ON
STAINLESS STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Vaverka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jiří Vaverka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Závislost geometrie vnitřního koutového svaru při laserovém svařování s rozmítáním svazku u korozivzdorné oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě zhotovených metalografických výbrusů uvést do souvislosti geometrii vzniklého koutového svaru s procesními parametry rozmítaného svazku.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si problematiku laserového svařování materiálu. Seznámit se z možnosti techniky laserového svařování s rozmítaným svazkem. Osvojit si základy metalografického vyhodnocení svaru. Osvojit si metodiku návrhu a vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VAVERKA Jiří: Závislost geometrie vnitřního koutového svaru při laserovém svařování s rozmítáním svazku u korozivzdorné oceli.

Laserové svařování je jedna z nejvíce se rozvíjejících metod spojování materiálů, a proto je nutné prozkoumat všechny možnosti této metody. Tato bakalářská práce se zabývá laserovým svařováním vnitřních koutových svarů s rozmítáním svazku u korozivzdorných ocelí. Bylo provedeno svaření pěti zkušebních vzorků s různými průměry rozmítacích kružnic. Po zhotovení metalografických výbrusů těchto svarů byla prozkoumána závislost geometrie svaru na svařovacích parametrech.

Klíčová slova: Laser, svařování, rozmítání, koutový svar, korozivzdorná ocel

ABSTRACT

VAVERKA Jiří: Dependence of fillet weld seam geometry in laser welding with wobbling on stainless steel.

Laser welding is one of the most developing methods of connecting materials and that's the reason, why it is necessary to explore all possibilities of this method. This bachelor thesis is focused on laser welding of fillet welds with wobbling on stainless steel. Five testing pieces were made with different diameters of wobbling circles. Study of dependence of seam geometry on welding parameters was executed on these welds.

Keywords: Laser, welding, wobbling, fillet weld, stainless steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAVERKA, Jiří. *Závislost geometrie vnitřního koutového svaru při laserovém svařování s rozmítáním svazku u korozivzdorné oceli*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116799>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za rady a věcné připomínky při tvorbě této bakalářské práce. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za podporu během celého bakalářského studia.

OBSAH

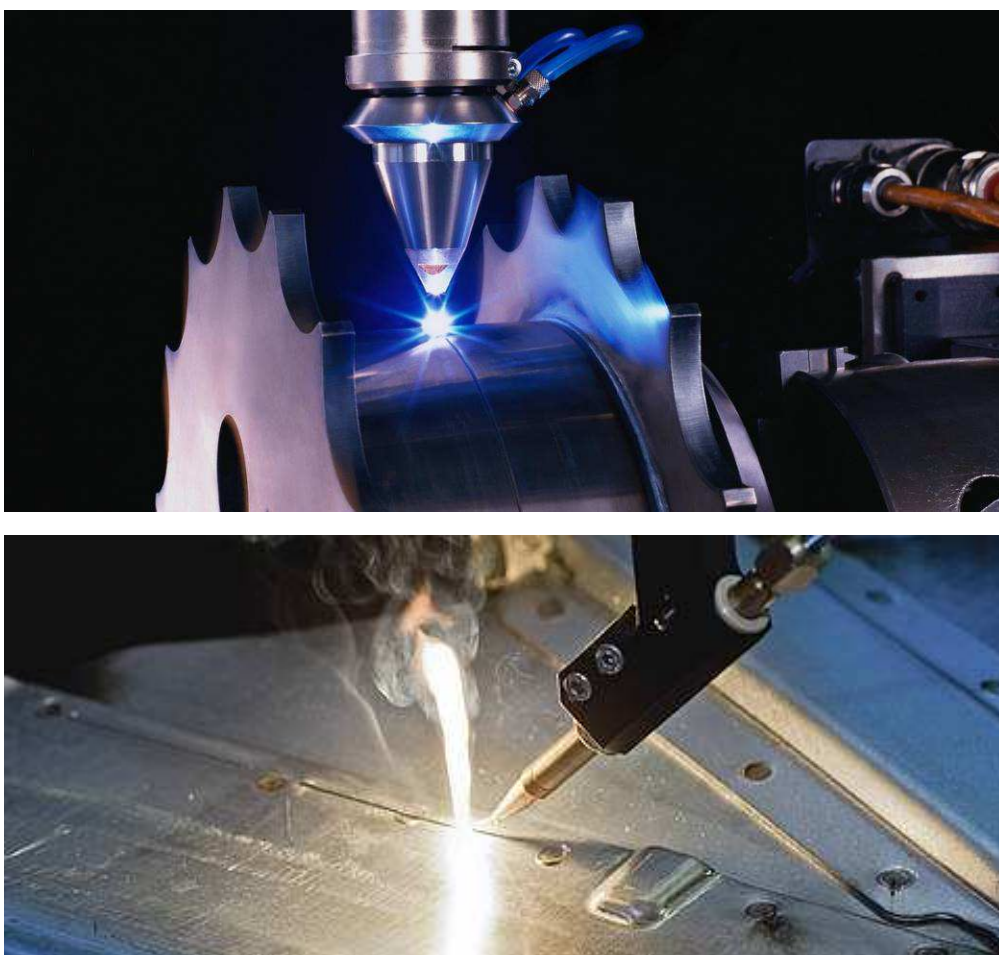
Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADADÁNÍ.....	10
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM	12
2.1 Druhy laserů	13
2.2 Princip svařování.....	15
2.3 Rozmítání svazku	17
2.4 Svařitelnost materiálů.....	19
2.5 Svarové vady	19
3 EXPERIMENT.....	22
3.1 Vzorek č. 1	24
3.2 Vzorek č. 2	25
3.3 Vzorek č. 3	26
3.4 Vzorek č. 4	27
3.5 Vzorek č. 5	28
3.6 Shrnutí výsledků.....	29
4 ZÁVĚRY	30
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1, 2, 3, 4]

Už od druhé poloviny devatenáctého století je svařování velmi rychle se rozvíjející oblastí spojování kovových materiálů. V mnoha oblastech nahradilo nebo doplnilo svařování ostatní způsoby spojů, jako jsou nýtové a šroubové spoje. Stalo se tak hlavně v oblasti stavebnictví. V roce 1927 postavili ve Škodových závodech první celosvařovaný most, který byl ve své době nejdelším svařovaným mostem na světě.

Mezi nejrozšířenější metody patří svařování elektrickým obloukem. V těchto metodách se využívá ionizovaného plynu a nataveného přídavného materiálu, který tvoří svarový kov. Tyto způsoby svařování se nazývají tavné a patří mezi ně také svařování plazmou, elektrosrtuskou, proudem elektronů a laserem. Posledně jmenovaná metoda si díky své výkonnosti, kvalitě svaru a možnosti automatizace, vydobyla své místo v sériové a hromadné výrobě. Vytváří svary s malou tepelně ovlivněnou oblastí, je velmi rychlá a přesná i při mnoha opakováních.

Laserové svařování má jistě velkou budoucnost, proto je potřeba zdokonalit a prozkoumat všechny možnosti této metody. Díky absenci přídavného materiálu, se laser využívá hlavně při tupých svarech. Nové poznatky v této oblasti však umožňují svařovat efektivně i koutové svary. Příklady laserového svařování lze vidět na obrázcích 1.

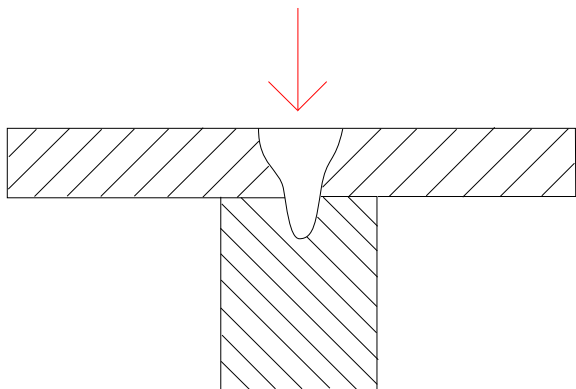


Obr. 1 Příklady svařování laserem [3, 4]

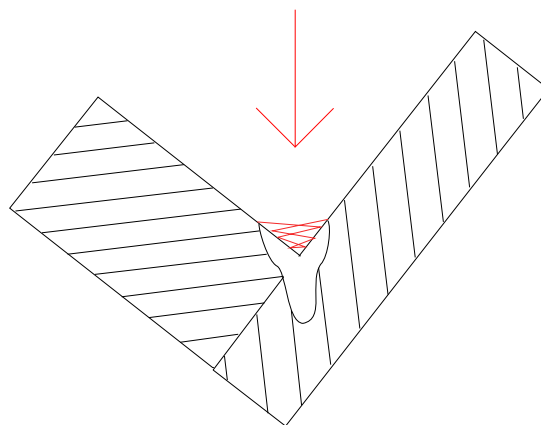
1 ROZBOR ZADADÁNÍ [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 28, 29, 30]

Koutové svary jsou neodmyslitelnou součástí svařovaných konstrukcí. Můžeme je najít prakticky všude, proto je snaha o zjednodušení, zdokonalení a urychlení jejich výroby. Při hromadné výrobě je obzvláště důležitá automatizace a zrychlování procesů. Z tohoto důvodu je snaha využít laserového svařování.

Při běžném svařování koutových svarů laserem se používá takzvaný T-spoj, při kterém dopadá paprsek z vnější strany spoje (obr. 2). Druhá možnost je vnitřní koutový svar (obr. 3), při kterém dochází k mnohonásobnému odrazu paprsku. Jelikož je laserové svařování metoda bez přídavného materiálu, tak je svarový kov získáván z natavení ploch dílců, a proto je zde riziko ztenčení jedné z nich.



Obr. 2 T-spoj [1]



Obr. 3 Vnitřní koutový svar

Při návrhu svařované konstrukce je nutné zvolit optimální metodu svařování, která bude nejlepší jak z pohledu použitelnosti, tak výsledných vlastností svaru. Tři základní vybrané metody jsou:

- MIG/MAG – při této metodě je tavná elektroda využita, jako zdroj elektrického oblouku a zároveň jako zásoba přídavného materiálu pro svar. Tento proces lze velmi dobře automatizovat i robotizovat. Problém nastává ve velikosti tepelně ovlivněné oblasti, která následně ovlivňuje mechanické vlastnosti součástí. V porovnání s využitím laseru je tato metoda pomalejší, ale pro malé výrobní série finančně výhodnější. Ukázka koutového svaru vytvořeného metodou MIG/ MAG je na obrázku 4.



Obr. 4 Koutový svar MIG/MAG [6]

- LaserHybrid – v tomto případě laser, který zaručuje vysoký průvar způsobený vysokou energií paprsku, doplňuje metodu MIG. Tato metoda je tedy kombinace dvou způsobů svařování a čerpá výhody každého z nich. Díky laseru jsou svary tvořeny rychleji než při klasickém obloukovém svařování a díky přídavnému materiálu nejsou problémy s většími mezerami mezi jednotlivými dílci. Nevýhodou jsou velké rozměry svařovací hlavy, která se nemusí vejít do všech požadovaných prostor (obr. 5).



Obr. 5 LaserHybrid svařovací hlava [7]

- Laser s rozmítáním paprsku – tato metoda je principiálně stejná jako klasické laserové svařování, ale je doplněna o rozmítání světelného paprsku. Rozmítání je v podstatě přidání dalšího pohybu, například kružnice, do jednoduchého dopředného posuvu. Tento jev způsobuje míchání svarovou lázní, což dává možnost ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti a geometrii svaru. Typický tvar laserového svaru se vytrácí a více se blíží klasickému tvaru, například vytvořeného obloukovou metodou. Všechno toto je umožněno dvěma typy speciálních svařovacích hlav, a to skenerovou a rozmítací hlavou. Druhá jmenovaná, viz obrázek 6, je kompaktnější, avšak dražší.



Obr. 6 Hlava pro rozmítání svazku [9]

Pro experiment byla vybrána třetí metoda, jelikož je u ní zajímavý odklon od klasické geometrie laserového svaru. Je nutné prozkoumat, zda bude rozmítání při vnitřních koutových svarech způsobovat problémy s utavením kovu na plochách dílců a tím pádem ztenčovat tloušťku stěn nebo zdali se tento problém nebude moc projevovat. Tato metoda by také mohla zaručit rovnoměrnější průvar po celé hloubce svaru.

Materiálem na vyhotovení zkušebních vzorků byla zvolena korozivzdorná austenitická ocel X5CrNi18-10. Je to nejčastěji používaná ocel, která se lidově nazývá potravinářská. Tento název je odvozen od jejího častého využití ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Ocel odolává velmi dobře atmosférické korozi v ne příliš znečištěném venkovním prostředí. V potravinářském průmyslu je výhodou odolnost vůči ovocným šťávám, mléčným výrobkům, pivu a vodě. Vlastnosti materiálu způsobují, že je hlubokotažný, dobře lešitelný, svařitelný a odolný proti opotřebení. U svařování vzniká nebezpečí mezikrystalové korozi. Ta vzniká při ovlivnění teplem mezi 450 °C a 850 °C, kdy se chrom, který zabraňuje korozi, vyloučí do karbidů a tím sníží hmotnostní obsah této legury v okolí svaru. Aby se tomuto jevu zabránilo, je doporučeno po svaření provést rozpouštěcí žíhání v rozmezí teplot 1000 ÷ 1100 °C, s následným ochlazením ve vodě nebo rychle na vzduchu. Rychle ochlazení zabrání opětovnému vzniku karbidů. Jelikož je to austenitická ocel, tak nelze provádět kalení. Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ se pohybuje v rozsahu 190 ÷ 290 MPa. Mez pevnosti R_m nabývá hodnot 500 ÷ 750 MPa. Nárazová práce KV dosahuje hodnoty až 100 J. Austenitické oceli mají obecně velkou tepelnou roztažnost, což může způsobovat vznik deformací a vznik zbytkového pnutí. Chemické složení zvolené oceli je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Chemické složení [hm. %] [30]

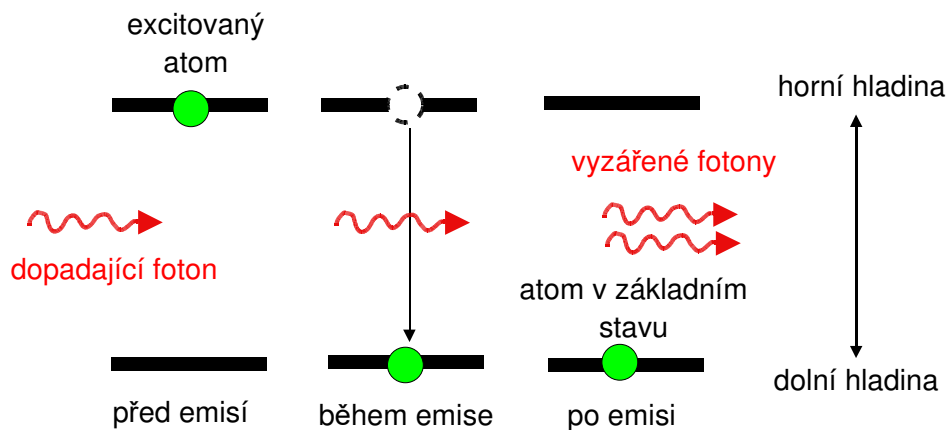
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
max 0,07	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,015	17,5 ÷ 19,5	8,00 ÷ 10,5	max 0,11

Ocel je dodávána v tyčích, pásech, profilech, trubkách svařovaných i bezešvých a v tažených drátech. Použitá ocel byla od firmy Otokumpu a atest oceli je v příloze 1.

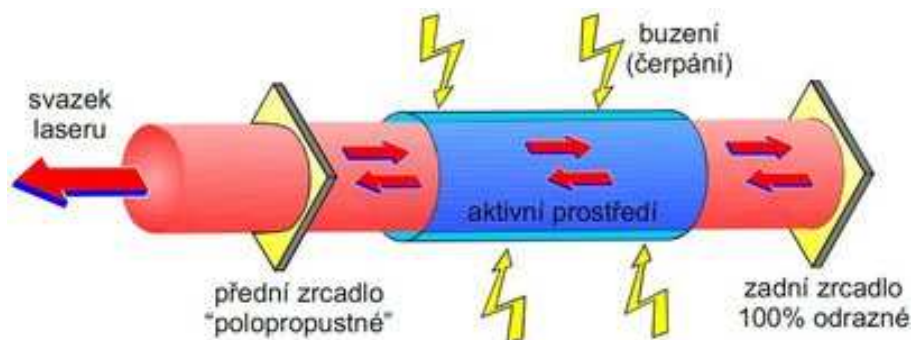
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM [1, 2, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

Jako každá technologie i laserové svařování má svá specifika, ať už jde o zdroje energie, nástroje nebo použitelnost. Proto je nutné pochopit základní principy a možnosti tohoto způsobu výroby svarů. Významnou oblastí pro porozumění této technologii jsou samotné lasery.

Slovo LASER je akronym z počátečních písmen anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Jak vyplývá ze samotného názvu, tak fyzikální princip laseru je založen na spontánní a stimulované emisi fotonů. Emise je spojena s přechodem atomu z jedné energetické hladiny na druhou. Tyto atomy musí při přechodu z vyšší hladiny na nižší vyzářit foton. Za běžného stavu mají atomy nejnižší možnou energii. Proto je nutné buzení, které dostane atomy do vyššího energetického stavu. Následně je vyvolán přechod zpět na nižší hladinu pomocí fotonu. Během tohoto děje je vyzářen další foton a tímto je zesíleno záření. Princip je vysvětlen na obrázku 7. Tento děj probíhá v rezonátoru, který je zobrazen na obrázku 8. Ten většinou tvoří aktivní prostředí a dvě zrcadla. Tím je dosažena požadovaná síla záření.



Obr. 8 Fyzikální princip laseru [14]



Obr. 7 Rezonátor [15]

Výsledné světlo se liší v mnoha aspektech od běžného světla. Hlavní rozdíl je v tom, že světlo vycházející z laseru je:

- Monochromatické – všechny vlny mají stejnou vlnovou délku.
- Koherentní – žádná z vln není fázově posunutá oproti ostatním.
- Nerozšířivé – paprsek je i na delší vzdálenosti stále zaostřený

2.1 Druhy laserů [1, 2, 10, 11, 12, 13, 14]

S postupem času byly vynalézány nové typy laserů a ty následně zdokonalovány. Proto je nutno zavést základní rozdělení. Hlavní kritéria, dle kterých je lze dělit jsou:

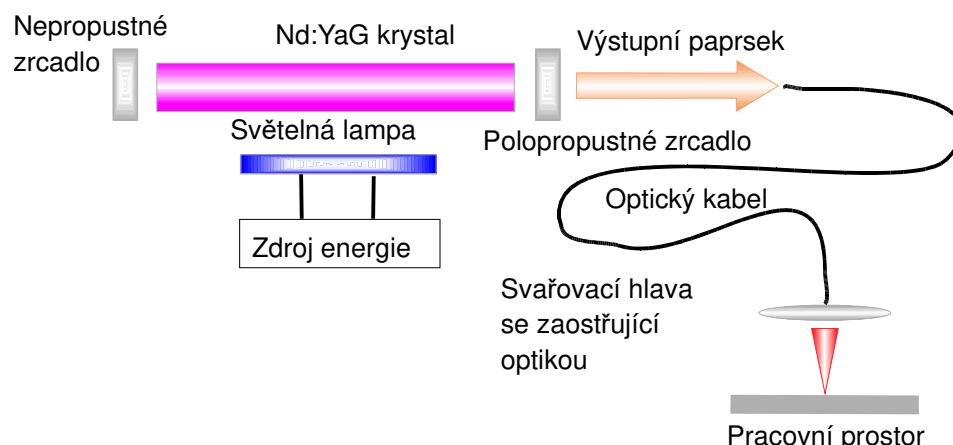
➤ Charakter aktivního prostředí:

- Pevnolátkové lasery – pro tento druh se jako aktivní prostředí používají monokrystaly nebo amorfní látky s přísadami vhodných látek. Energie je absorbována i vyzařována při změně energetického stavu právě těchto přísadových látek. Tyto příměsi musejí splňovat řadu podmínek jak fyzikálních, tak mechanických. Nejpoužívanější jsou prvky železa (Cr, Ni, Co) a lanthanoidy (Nd, Sm, Gd, ...) Druh použitého aktivního prostředí má vliv na konečnou vlnovou délku. Tuto závislost vyjadřuje tabulka 2.

Tab. 2 Druhy laserů používaných pro svařování [2]

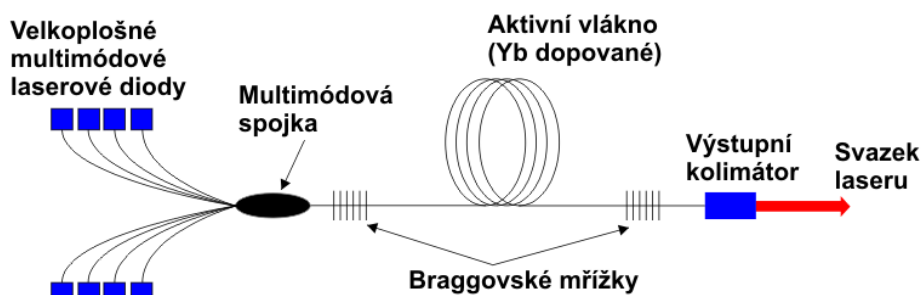
Název	Aktivní prostředí		Vlnová délka λ (μm)
	Iont	Materiál	
Rubín	Cr^{3+}	Al_2O_3	0,694
Neodymové sklo	Nd^{3+}	Sklo	1,060
Nd:YaG	Nd^{3+}	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1,065

Z těchto typů se nejvíce používá Nd:YaG, jehož schéma je zobrazeno na obrázku 9. Může pracovat v kontinuálním i pulzním režimu a jeho paprsek může být dopravován na místo svaru pomocí optického kabelu.



Obr. 9 Schéma Nd:YaG laseru [11]

Dalším používaným typem pevnolátkového laseru je vláknový laser. Zde je jako aktivní prostředí využité optické vlákno dopované Erbiem nebo Ytterbiem. Buzení probíhá pomocí laserových diod. Velká výhoda tohoto typu je, že nejsou použita žádná zrcadla, jen optická vlákna (obr. 11). Díky tomu je možno spojovat jednotlivé lasery a zvyšovat jejich výkon až do 80 kW.

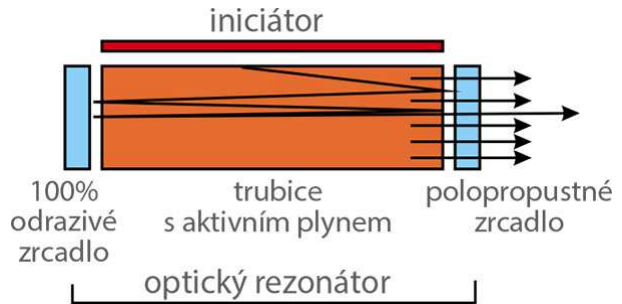


Obr. 10 Princip vláknového laseru [12]

- Plynové lasery – tento typ využívá jako aktivní prostředí plyny nebo směsi par a plynů. Vlnovou délkou záření pokrývají skoro celé spektrum a pracují v kontinuálním i pulzním režimu.

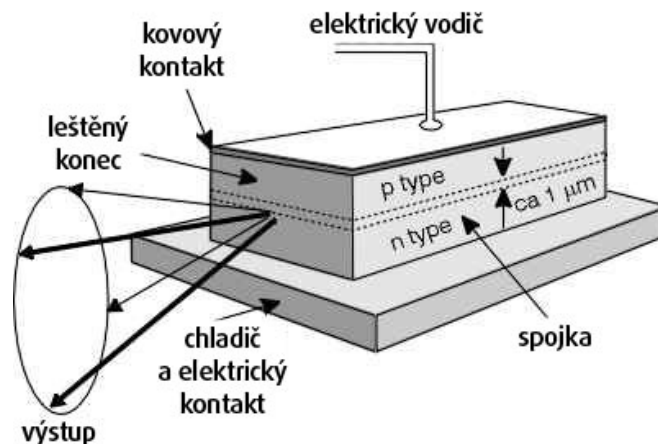
Nejběžnější typ plynového laseru je CO₂ laser. Jeho aktivní prostředí se skládá z He, N₂ a CO₂. Díky tomuto chemickému složení, jež snižuje cenu, spolehlivosti a jednoduchosti je stále oblíbený, i když jeho paprsek nejde přenášet optickým kabelem.

Může pracovat v rozmezí 0,5 až 200 kW. Účinnost je vyšší než u pevnolátkových laserů a může dosahovat až 20 %. V praxi se využívají lasery buzené radiofrekvenčně nebo elektrickým proudem. Druhé jmenované mají prakticky neomezenou životnost. Princip CO₂ laseru je zobrazen na obrázku 11.



Obr. 11 Princip CO₂ laseru [13]

- Diodové lasery – aktivním prostředím je elektricky čerpaná polovodičová dioda viz obr. 12. Tyto lasery mají velké rozpětí výkonů. Malé výkony se využívají v DVD mechanikách a laserových tiskárnách. V průmyslu nalezneme vysoké výkony v řádech kW. Výhodou tohoto typu je vysoká účinnost, avšak oproti ostatním ztrácí na kvalitě paprsku.



Obr. 12 Diodový laser [13]

➤ Režim práce:

- Kontinuální – paprsek vystupuje z laseru nepřetržitě
- Pulsní – laserový svazek vyzařuje v krátkých dávkách

2.2 Princip svařování [1, 2, 16]

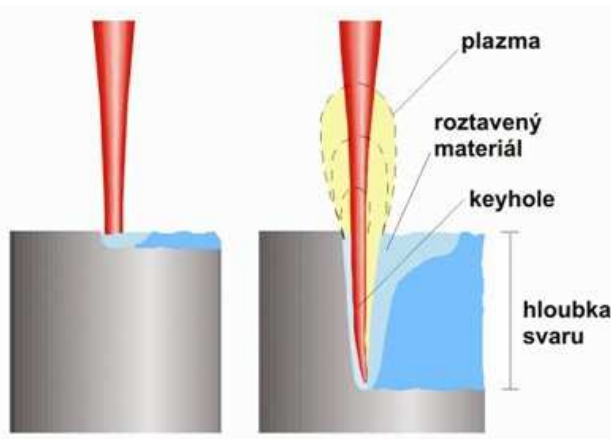
Dopadající paprsek laseru na povrch materiálu velmi zvyšuje jeho teplotu. Toho jevu se využívá u obou základních principů, a to svařováním kondukce a hlubokým průvarem. Rozdíl mezi těmito mechanismy je v plošné hustotě výkonu dopadajícího paprsku. V levé části obrázku 13 je zobrazena konduktce a v pravé hluboký průvar.

Svařování hlubokým průvarem využívá vysokou plošnou hustotu dopadající energie. Energie v místě dopadu paprsku je tak vysoká, že dochází k natavení a intenzivnímu odpařování materiálu. Tento jev vytváří charakteristickou kapiláru naplněnou horkými plyny, která se nazývá keyhole. Stěny tohoto kanálu jsou tvořeny roztaveným kovem svařovaných částí.

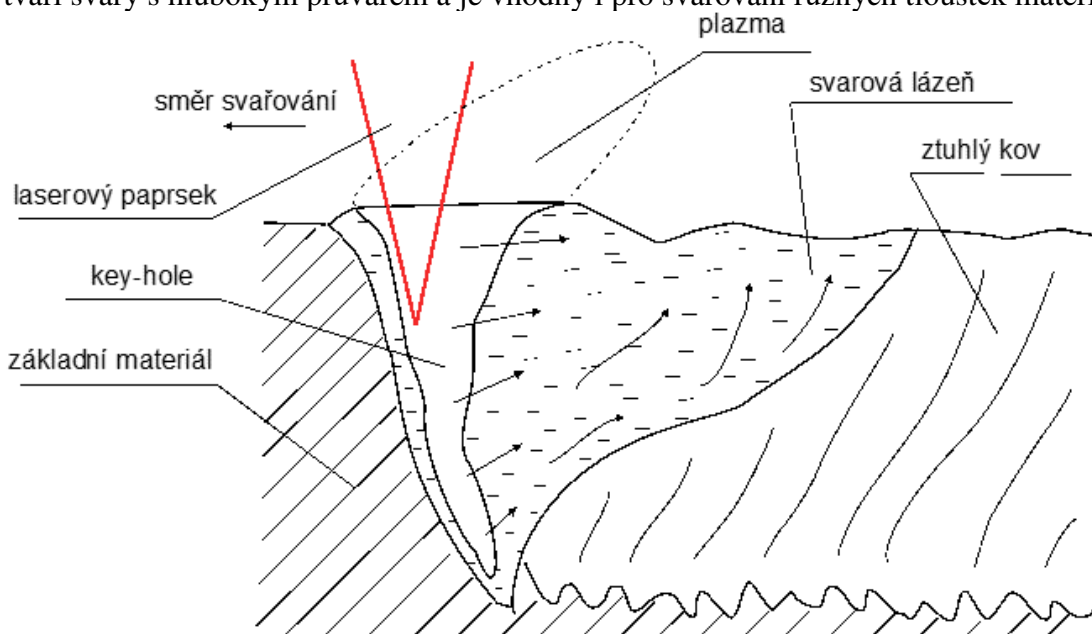
Tento kov se vlivem povrchových napětí za kapilárou slévá a tuhnutím vytváří

výsledný svar (obr.14). Při průchodu paprsku kanálem dochází k jeho mnohonásobnému odrazu a důsledkem toho vzniká svar, který má větší hloubku než šířku. Paprsek prostupuje do hloubky, než jeho energie klesne pod hodnotu, která je schopna vypařovat materiál.

Tato metoda je vhodná pro svařování tupých svarů bez předchozí úpravy stykových ploch. Vytváří svary s hlubokým průvarem a je vhodný i pro svařování různých tlouštěk materiálů.



Obr. 13 Mechanismu svařování [16]



Obr. 14 Princip svařování hlubokým průvarem [1]

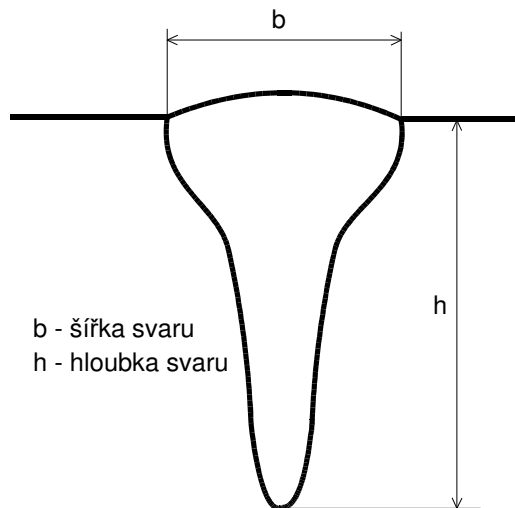
Svařování kondukce je proces, při kterém je plošná hustota výkonu paprsku malá a nedochází k hlubokému průvaru. Svařovaný materiál je natavován a teplo se šíří vedením. Teplota roztaveného kovu je nižší než vypařovací teplota, a proto nevzniká plazma.

Tato metoda se využívá většinou pro spojování velmi tenkých plechů. Díky malému tepelnému ovlivnění a výslednému tvaru svaru není nutná další úprava. Tento fakt vyhovuje

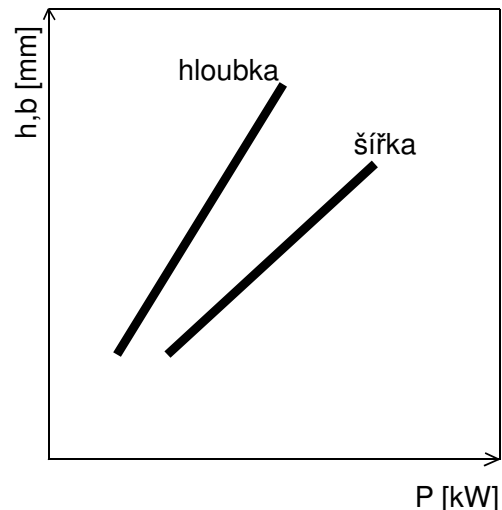
použití v elektrotechnickém průmyslu, kde se tato metoda používá při svařování drátků a plíšků v tloušťce několika desítek mikrometrů.

Oba tyto mechanismy lze provádět za dvou režimů:

- **Kontinuální** – při tomto režimu dodává laserový paprsek energii stále, neměnně v čase. Základní parametry jsou výkon a rychlost svařování. Výkon laseru je v tomto případě chápán jako množství zaměřeného záření do fokusačního systému. Při zvyšování výkonu roste hloubka průvaru. Základní geometrie svaru je zobrazena na obrázku 15. Závislost této geometrie na výkonu je pak na obrázku 16. Rychlost svařování označuje dráhu, kterou opíše zdroj ohřevu za jednotku času. Zvyšováním rychlosti klesne hloubka průvaru i deformace součásti.



Obr. 15 Geometrie svaru při hlubokém průvaru [1]

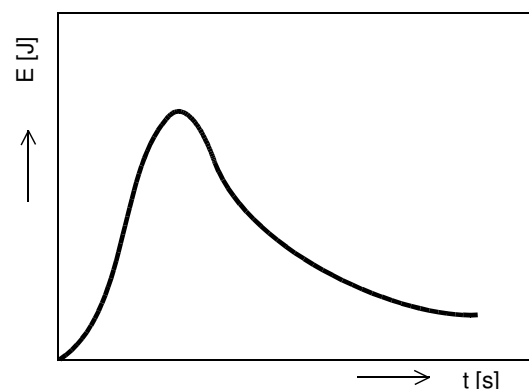


Obr. 16 Závislost geometrie na výkonu [1]

- **Pulzní** – v průběhu tohoto režimu je energie dodávána v krátkých impulzech. Tímto způsobem se svar tvoří postupným pokládáním svarových bodů s částečným překrytím. Základními parametry jsou energie impulzu, rychlost svařování, výkon jednoho impulzu, frekvence, délka impulzu a tvar funkce impulzu.

Délka impulzu udává dobu, po kterou bude materiál ohříván a nataven. Pro každý materiál a tloušťku existuje optimální délka impulzu. Experimentálně se určí interval délky impulzu a většinou se použije hodnota blíže horní hranici. To zaručí dostatečné odpaření par a sníží riziko vytvoření pórů.

Charakteristický tvar funkce impulzu Nd:YaG laseru je na obrázku 17. V první části impulzu je do místa svaru přiváděno množství energie a nastává tavení materiálu. V klesající části následně roste podíl tuhé fáze na úkor tekuté.

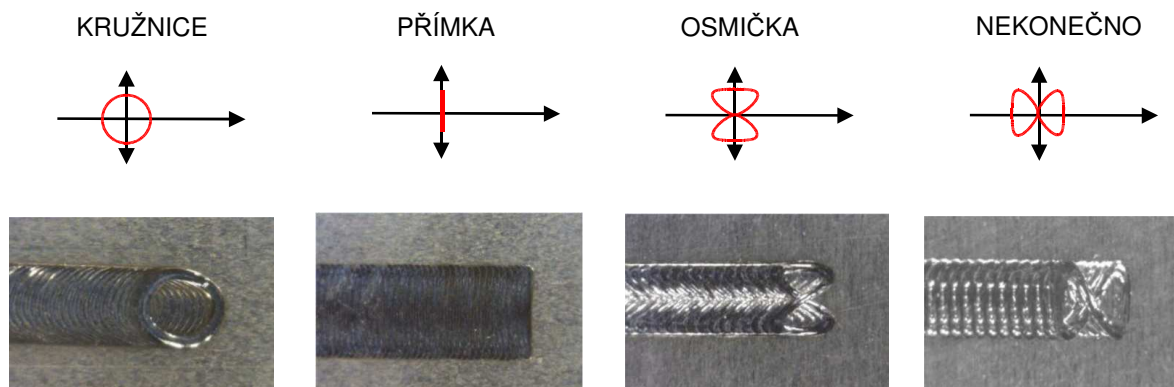


Obr. 17 Charakteristický tvar impulzu Nd:YaG laseru [1]

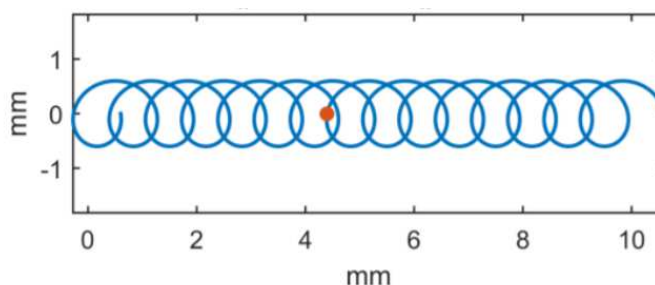
2.3 Rozmítání svazku [8, 18, 19, 20, 21, 31, 32, 33, 34]

Při klasickém laserovém svařování se pohyb paprsku uskutečňuje jen po přímce nebo křivce. Rozmítání svazku do tohoto jednoduchého pohybu přidá další primitivní křivku, jako je kružnice, přímka nebo osmička. Tento tvar ovlivňuje výsledný vzhled svaru (obr. 18)

V případě přidání kružnice tím trajektorie laseru změní svůj tvar na spirálu. Vznik spirály je zobrazen na obrázku 19.



Obr. 18 Rozmítací křivky [33]



Obr. 19 Trajektorie rozmítání kružnic [19]

Tato metoda ovlivňuje geometrii svaru, jelikož dochází k navrácení paprsku do již tuhnutí kovu a tím ho znovu ohřívá. Svar ztrácí charakteristické zúžení v horní části a při různých rozmítáních, ale stejném výkonu laseru, se zmenšuje hloubka průvaru. Svazek laseru tedy míchá se svarovou lázní a ovlivňuje metalurgické procesy při tuhnutí. Snižuje se tím riziko vzniku vad a mění se výsledné mechanické vlastnosti. Díky širšímu působení paprsku, vzniká možnost svařovat plechy, které mají větší mezeru ve styku. Rozmítání také zlepšilo spojování odlišných materiálů. Tavení a propojování dvou materiálů lze ovlivnit volbou správné kombinace parametrů. Ke klasickým svařovacím parametrům přibývají další tři, a to:

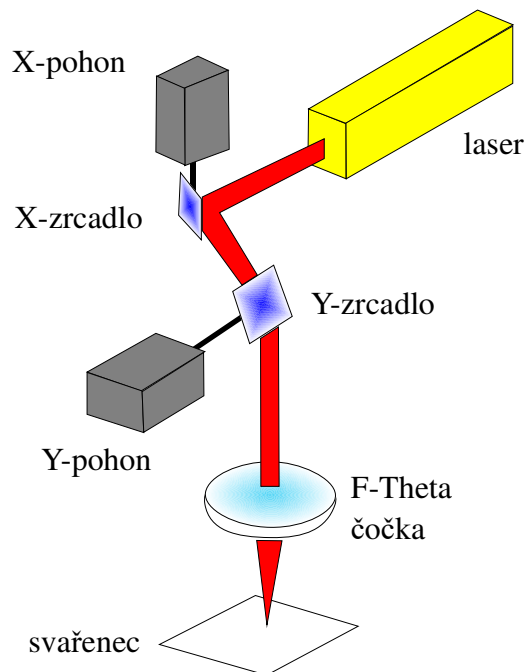
- tvar primitivní křivky,
- velikost rozmítací křivky,
- frekvence rozmítání.

Tento způsob svařování byl umožněn díky dvěma typům svařovacích hlav:

- Skenerová hlava (obr. 20) – obsahuje dvě nastavitelná zrcadla (obr. 21), která dokáží zaměřit paprsek kamkoliv, v určité oblasti, bez pohybu hlavy. Přimontováním tohoto přípravku na robotické rameno lze svařovat s rozmítáním svazku v rozsahu větší plochy. Nevýhodou je značná velikost a tím způsobená špatná přístupnost na některá místa.

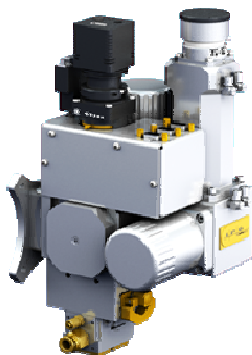


Obr. 20 Skenerová hlav [20]



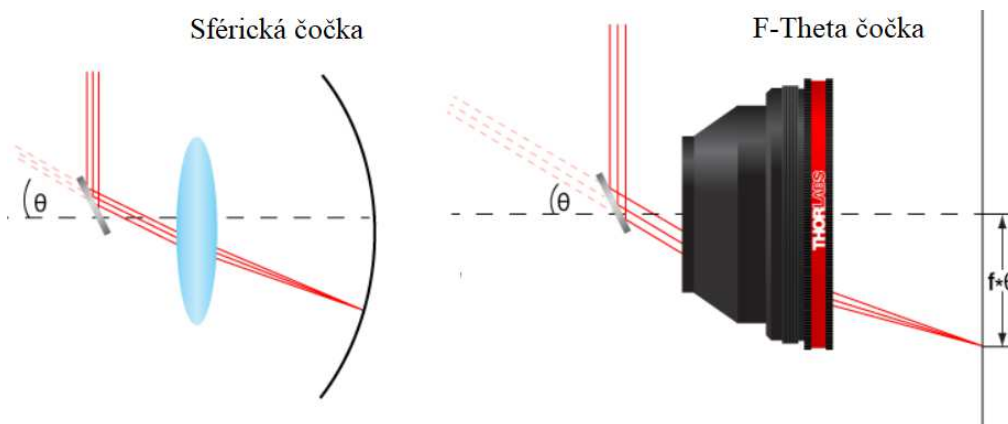
Obr. 21 Schéma skenerové hlavy [34]

- Rozmítací hlava (obr. 21) – obsahuje dvě nastavitelná zrcadla, která jsou však menší a mají menší rozsah pohybu než u skenerové hlavy. Díky tomu jsou zmenšeny celkové rozměry nástroje. Tyto hlavy mohou také místo zrcadel obsahovat rotující optický hranol, avšak přídatný pohyb může být pak jen kružnice. Nevýhodou těchto speciálních rozmítacích hlav je jejich vysoká pořizovací cena, která se však rychle vrátí při začlenění do procesů spojených s hromadnou výrobou.



Obr. 22 Rozmítací hlava [21]

Jelikož je to proces, při kterém dopadá paprsek na více míst a není tedy zaměřen jen do jednoho bodu, je zde problém v rozdílu skutečné a efektivní vzdálenosti paprsku po celou dobu opisování rozmítací křivky. Tento rozdíl by měl vliv na vnesenou energii, která by nebyla konstantní po dobu svařování. Obě svařovací hlavy mají tento problém vyřešen jiným způsobem. Základní rozdíl mezi skenerovou a rozmítací hlavou je v použitých čočkách. Protože je oblast u skenerové hlavy, kam může dopadnout paprsek, velká, tak by s běžnou čočkou byl velký rozdíl mezi již zmiňovanými vzdálenostmi paprsku od svařence. Proto se využívá F-Theta čoček. Tyto speciální čočky se skládají z více optických částí a zaručují stále stejně zaostřený paprsek po celé referenční oblasti. U rozmítacích hlav je oblast, ve které se paprsek pohybuje menší, proto stačí užití běžných sférických čoček. Rozdíl mezi těmito čočkami je vykreslen na obrázku 23.



Obr. 23 Efektivní vzdálenost zaostření paprsku [33]

2.4 Svařitelnost materiálů [1, 2]

Svařitelnost materiálu laserem se odvíjí od jeho chemického složení, rozměrů a stavu povrchu a moc se neliší od svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře. Možnost svařit konkrétní materiál je také závislá na schopnosti absorbovat teplo z laserového paprsku. Ta se dá ovlivnit různými způsoby, jako jsou zdrsňení povrchu, nanesení látky s vyšší absorpcí, mořením nebo předehřevem. Oceli svařované laserem nesmí mít větší obsah uhlíku než 0,2 % kvůli rychlému ochlazení. Výborné výsledky svařování laserem byly docíleny u vysokolegovaných ocelí. Svařitelnost vybraných materiálů je zobrazena v tabulce 3.

Tab. 3 Svařitelnost materiálů laserovým paprskem [1]

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	□													
Ag	○	○												
Au	○	□	□											
Cu	○	○	□	□										
Pd		□	□	□										
Ni	○		□	□	□	□								
Pt		○	□	□	□	□	□							
Fe			○	○	●	●	●	□						
Be			○	○	○	○		○						
Ti	○	○	○	○	○	○	○			□				
Cr			○		●	●	□			●				
Mo						○	□			□	□			
Te					●	●	○	○		□		□		
W					○	○	●	○			□	□	□	□

□-velmi dobrá ●-dobrá ○-dostačující svařitelnost

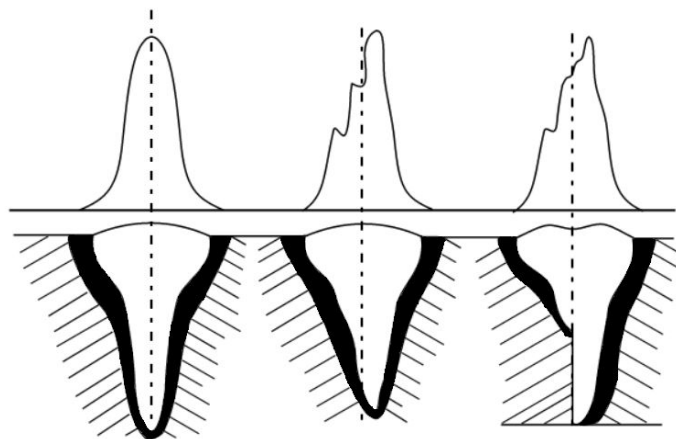
2.5 Svarové vady [1, 10, 22, 23, 24, 25, 26, 27]

Vady ve svarech jsou nebezpečné koncentrátoři napětí, které ovlivňují celkové mechanické vlastnosti svaru, snižují mez únavy a mohou být zdrojem křehkého lomu. Aby se těmto vadám zabránilo, musí být zvoleny správné svařovací parametry nebo musí dojít k celkové změně technologie výroby. Pro zjištění svarových vad se ve výrobě používají nedestruktivní zkoušky, které zaručí rychlé objevení vady bez zničení svařence. Mezi základní metody patří ultrazvuk, magnet, rentgen a penetrační zkouška.

Klasifikace těchto vad je provedena na základě příslušných norem a smlouvy se zákazníkem. Podle norem se vady dělí na přípustné a nepřípustné. Nepřípustné dále na opravitelné a neopravitelné. Základní rozdělení lze provést dle dvou kritérií:

- ❖ Tvar:
 - Bodové (mikropóry, malé sférické vměstky)
 - Plošné (neprůvar, trhlina, studený spoj)
 - Objemové (póry, bubliny, vměstky, nedodržené rozměry svaru)
- ❖ Poloha:
 - Povrchové (trhliny, neprovařený kořen, zápaly)
 - Vnitřní (plynové dutiny, póry, vměstky, staženiny)

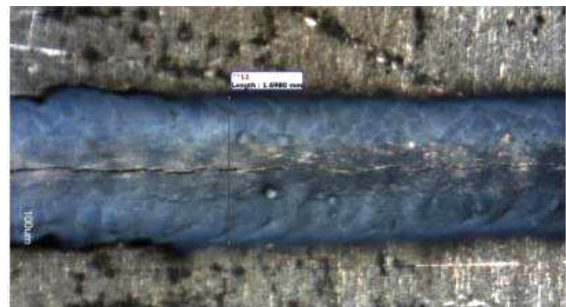
Tyto vady se vyskytují u všech svařovacích metod. U laserového svařování mohou mít některé defekty, jako například studený spoj, jiný důvod vzniku než u obloukového svařování. Studený spoj při laserovém svařování vzniká v důsledku nesymetrického rozložení energie okolo osy kolmé na svar. I když laserový paprsek dopadá do středu svaru, tak špička paroplynového kanálu se v hloubce odchýlí od osy a ve větší hloubce dochází k přehřátí jednoho z materiálů, zatímco u druhého nedojde k dostatečnému natavení. Tím vzniká odlišná tepelně ovlivněná oblast u obou dílců a v nejhorším případě ke studenému spoji. Tento jev je zobrazen na obrázku 24. V pravém zobrazení je ideální rozložení energie a symetrický průvar. Uprostřed je částečné odchýlení od osy a tím způsobené větší ovlivnění pravého materiálu. V posledním případě je odklon od osy tak velký, že došlo ke studenému spoji.



Obr. 24 Vliv rozložení energie okolo osy na svar [1]

Dalším nebezpečím je tvorba trhlin. Trhliny ve svarovém kovu vznikají buď za tepla anebo za studena. Oba tyto druhy mají jiný důvod vzniku. Trhliny za tepla souvisejí s deformací krystalizujících zrn kovu. Pro určení náchylnosti kovu k této vadě se musí určit kritická rychlost deformace. Od té se následně odvíjí rychlost chladnutí.

Vznik trhlin za studena je zapříčiněn výslednou napjatostí ve svaru nebo tepelně ovlivněné části kovu. Při svařování laserem je tato oblast malá, a tudíž riziko vzniku tohoto defektu menší než u klasických metod svařování. Trhlina ve svaru je vyfocena na obrázku 25.

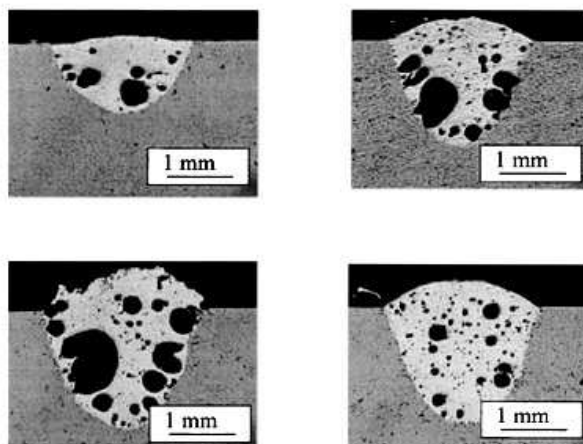


Obr. 25 Trhlina ve svaru [22]

Velkým problémem u laserového svařování je vznik pórů (obr. 26). Porosita svaru vytvořeného laserem může být způsobena více příčinami. Jednou z nich je špatná příprava stykových ploch. Při jejich špatném očištění nebo špatným nanesením přípravku pro zvýšení absorpce, může následně dojít k tvorbě plynů, které vytvoří póry a plynové bubliny.

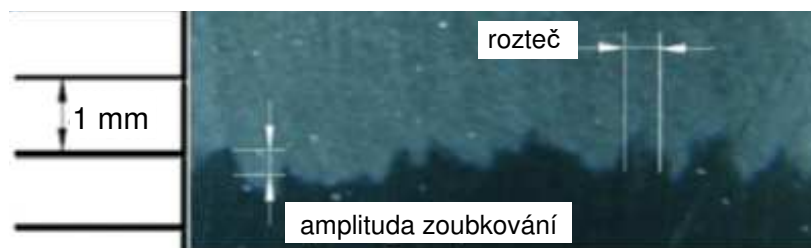
Svarový kov může také reagovat s okolní atmosférou a začít oxidovat. Aby se tomuto nežádoucímu jevu zabránilo, přivádí se do místa svařování inertní ochranný plyn. Tok tohoto plynu je dalším parametrem, který musí být správně nastaven. Při malém toku dochází k oxidaci kovu a při velkém ke zbytečným ekonomickým ztrátám. Tento plyn plní také funkci odklonu výparů mimo osu paprsku laseru a tím zvyšuje jeho účinnost.

Nejčastější příčinou vzniku pórů je však špatné nastavení svařovacích parametrů, které zapříčiní nestabilní keyhole.



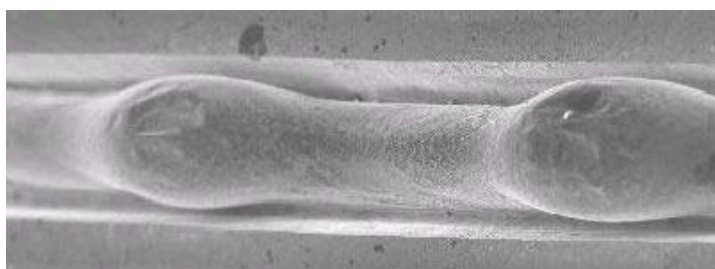
Obr. 26 Póry ve svaru [25]

Specifickou vadou u laserového svařování je takzvaný spiking neboli zoubkování. Dochází k němu nejčastěji při neúplném průvaru a je viditelnější při vyšších výkonech a větších hloubkách průvaru. Jde o periodickou změnu hloubky průvaru viz obr. 27.

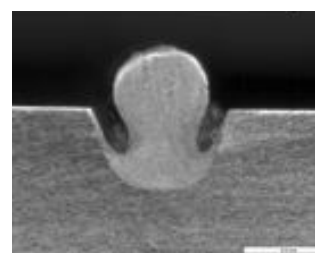


Obr. 27 Zoubkování [26]

Svarový kov má také na povrchu tendenci k jevu s názvem humping. Jde o periodické zužování a rozšiřování svaru (obr. 28). Humping se projevuje při vysokých rychlostech svařování a je způsoben vysokým povrchovým napětím. Ve zúžených oblastech svaru vzniká také riziko podpálení svaru, které bylo zachyceno na obrázku 29.



Obr. 28 Humping [27]



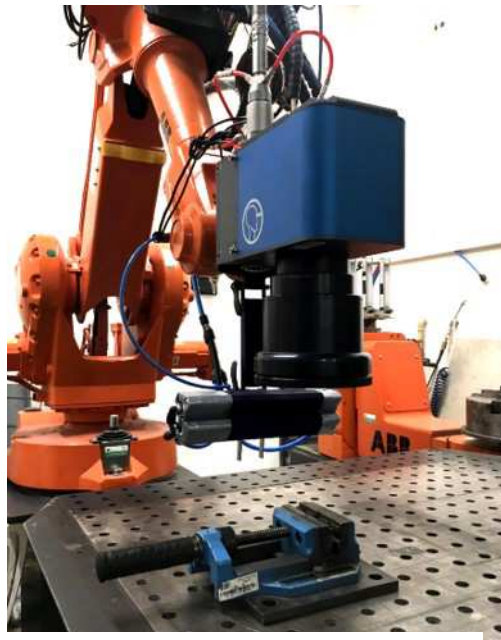
Obr. 29 Podpálení svaru [27]

3 EXPERIMENT

Experiment se skládal ze svaření pěti zkušebních vnitřních koutových svarů. Svařování proběhlo na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně, na laseru YLS 2000 od firmy IPG PHOTOTONICS s maximálním výkonem 2000 W. Fokusovaná vlnová délka tohoto laseru je 1,07 μm . Jako zdroj rozmítání byla zvolena skenerová hlava Rhino Fiber 31 firmy ARGES na robotickém ramenu (obr. 30). Tato hlava má oblast zaměření paprsku o velikosti 205 x 205 mm a odstup hlavy od svařence byl 200 mm. Čočka hlavy byla před vystřikující plazmou chráněna vzduchovou clonou, která však nijak neovlivňovala svar. Ten byl chráněn přívodem inertního plynu. Pro experiment byl zvolen 100% argon.

První dva vzorky byly svařeny bez rozmítání svazku a lišily se pouze v rychlosti svařování. Tyto dva vzorky sloužily jako referenční pro změnu geometrie v dalších třech vzorcích. Pro následující tři svary byla zvolena vyšší rychlost z dvou předešlých, z důvodu lepší vizuální kvality svaru, a bylo přidáno rozmítání. Jednotlivé nastavení svařovacích parametrů se tedy lišilo pouze v poloměru rozmítací kružnice.

Před samotným svařováním laserem byly vzorky nastehovány do požadované polohy viz obr. 31. Jednotlivé plíšky měly tloušťku 3 mm a u všech sestavení byla zkontrolována kolmost. Pro experiment byly následně vybrány ty, které neměly zaoblené konce z důvodu snadnějšího upnutí do svěráku.



Obr. 31 Svařovací sestava



Obr. 30 Připravené plechy pro laserové svařování

Po svaření každého ze vzorků proběhlo označení, aby nedošlo k záměně. Všech pět svarů je zobrazeno na obrázku 32. Při bližším pohledu byla odhalena očividná deformace pravoúhlosti. Jelikož byly změřeny hodnoty úhlů před svařením, tak mohlo být provedeno porovnání velikosti úhlu před a po svaření. Následně bylo provedeno rozřezání vzorků v dílně VUT na řezačce Straus Labotom 5. Řezání vzorku číslo 3 je zachyceno na obrázku 33.



Obr. 32 Svařené vzorky



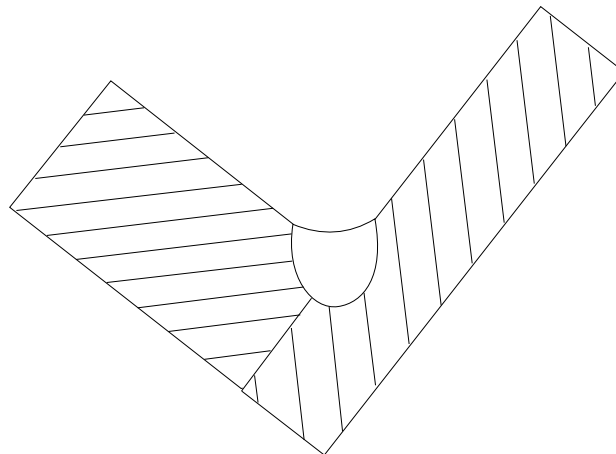
Obr. 33 Řezačka Straus Labotom 5

Pro zhotovení makrografických fotek bylo nutné zhotovit výbrusy. Broušení probíhalo na dvoukotoučové brusce/ leštičce ATM Saphir 330. Byly zvoleny tři zrnitosti brusných papírů a to 120, 220 a 500. Na každé z těchto úrovní byl vzorek přibližně 5 minut. Aby bylo vidět strukturu svaru, je důležité zvolit vhodnou leptací lázeň. Po opláchnutí vyleštěných ploch lihem pro odstranění mastnoty byly vzorky ponořeny do směsi s názvem 2-2-1 na 4 až 5 minut. Tato směs je používána na Cr-Ni austenitické oceli a její složení je uvedeno v tabulce 4.

Tab. 4 Leptací směs

Název	Složení	Použití
2-2-1	2 ml HF, 1 ml HNO ₃ , 2 ml glycerinu	Cr-Ni austenitické oceli

Po naleptání byly vzorky dány pod mikroskop a pomocí příslušného softwaru nafoceny detailní fotky struktury svarů. V tomto softwaru byla také změřena šířka na povrchu a po zúžení a hloubka průvaru každého svaru. Následně proběhlo celkové zhodnocení geometrie a kvality vzorků. Vyhodnocování bylo zaměřeno zejména na hloubku průvaru a na šířku svaru a její proměnlivost s přibývajícím hloubkou. Za hloubku průvaru byla brána největší kolmá vzdálenost od povrchové šířky. Dále byl pozorován předpokládaný odklon od klasického tvaru svaru vytvořeného laserem (obr. 34).



Obr. 34 Předpokládaný tvar svaru po rozmítání svazku

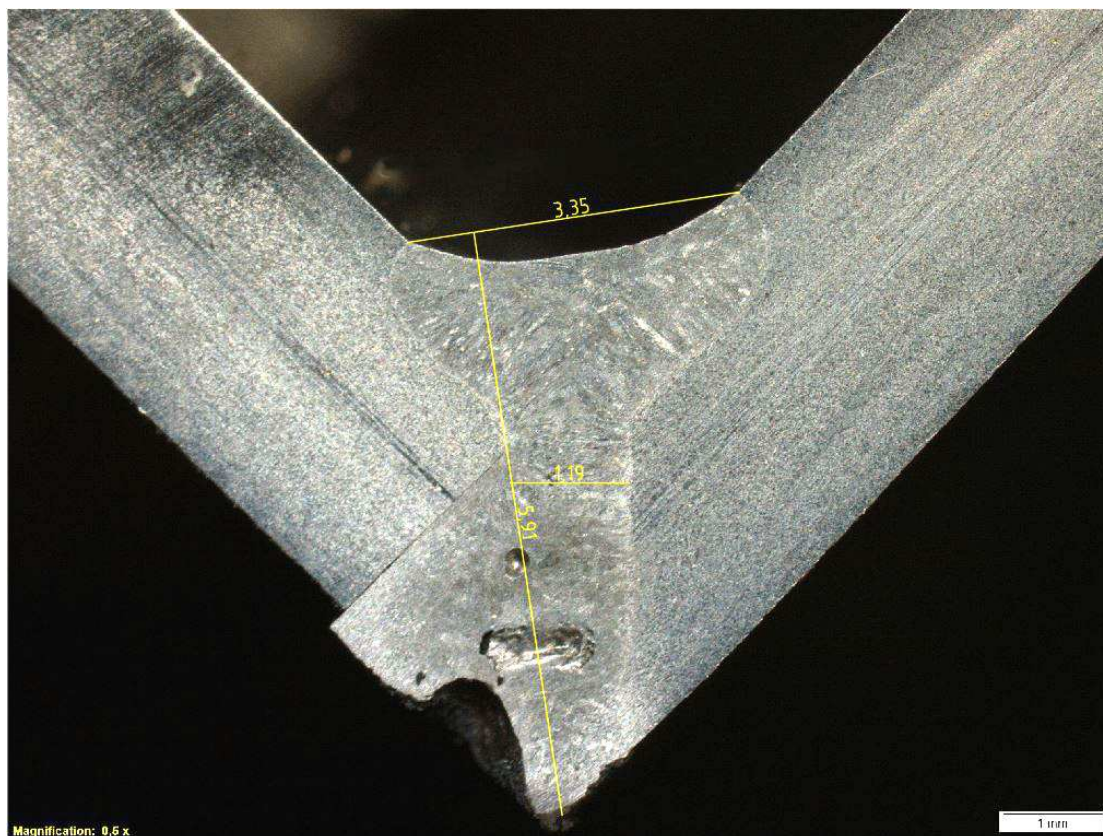
3.1 Vzorek č. 1

První vzorek byl svařen bez rozmítání svazku (obr. 35). Výkon laseru byl nastaven na 2000 W a rychlost svařování na 10 m/s. Po svaření bylo možno vidět velké díry v kořeni. Došlo k plnému průvaru, avšak rychlost byla tak malá, že zvolený výkon byl ve výsledku příliš vysoký. Svar neměl na povrchu rovnoměrnou šířku, což mohlo být způsobeno několikanásobným odrazem paprsku, který je charakteristický pro svařování vnitřních koutových svarů. Úhel byl před svařením 90° a po svaření 88° .



Obr. 35 Vzorek č. 1

Na výbrusu, viz obr. 36, jsou patrné krátery v kořeni a velké póry. Obě tyto vady byly nejspíše způsobeny kombinací malé rychlosti a vysokého výkonu, které způsobily příliš velkou vnesenou energii do oblasti svaru. Povrchová šířka svaru byla změřena v hodnotě 3,35 mm, po zúžení 1,19 mm a hloubka průvaru 5,91 mm. Oproti kořeni je povrch svaru bez vad. Svar byl vytvořen bez ztenčení stěn a došlo tedy k ideálnímu natavení plechů, které vytvořily samotnou výplň vnitřního koutového svaru. Celkový tvar svaru odpovídá klasickému tvaru vytvořeného laserovým svařováním hlubokým průvarem. Na povrchu je šířka největší a s rostoucí hloubkou se šířka rapidně zužuje.



Obr. 36 Výbrus vzorku č. 1

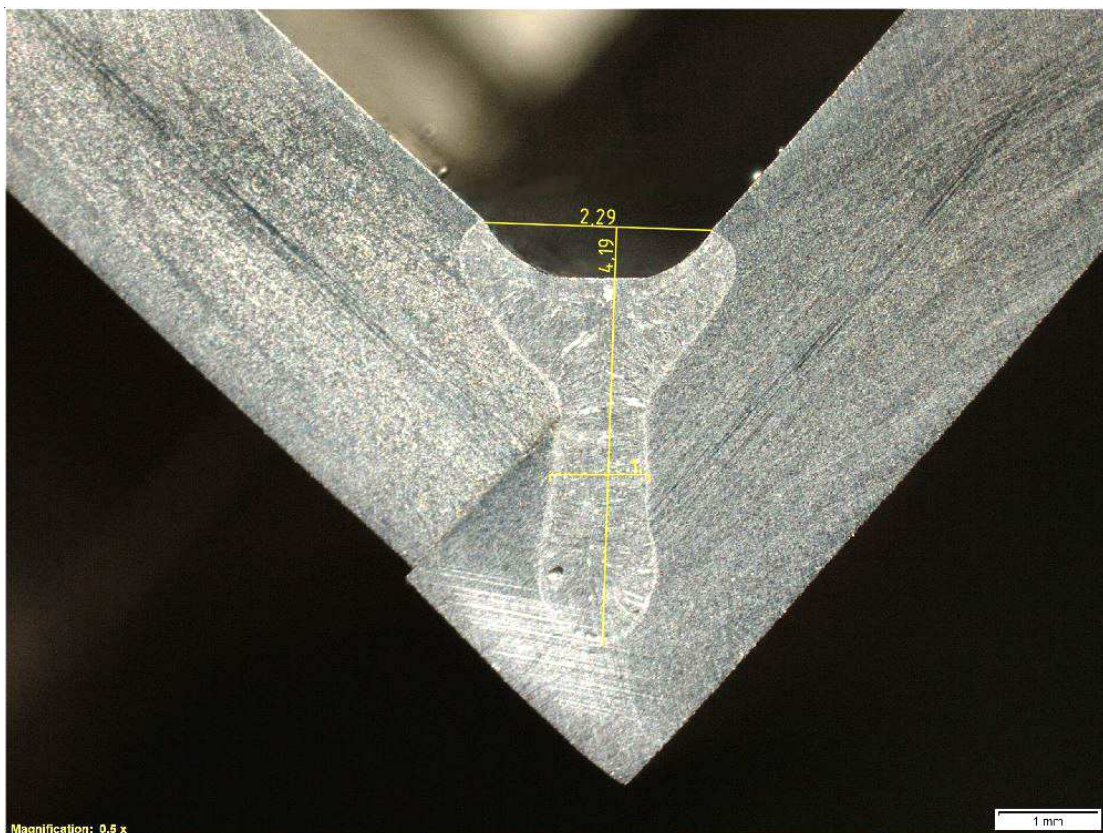
3.2 Vzorek č. 2

Druhý vzorek byl taktěž svařen bez rozmítání. Výkon laseru byl nastaven opět na 2000 W, ale rychlost byla zvýšena na 15 m/s. Vady v kořeni už nebyly patrné, a i vzhled povrchu svaru byl na pohled lepší. Šířka svarové housenky byla rovnoměrná. Nejspíš došlo k lepšímu nastavení plechů pod svařovací hlavu a paprsek tedy dopadal rovnoměrně do středu. Nedocházelo tedy k tak významnému mnohonásobnému odrazu, což zaručilo lepší svar. Úhlová deformace byla opět rovna 2° . Svařenec je zobrazen na obrázku 37.



Obr. 37 Vzorek č. 2

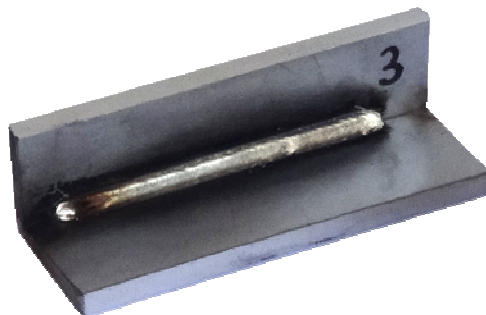
Výbrus tohoto svaru (obr. 38) ukazuje, že parametry už byly zvoleny lépe. Vyšší rychlost sice způsobila, že je menší hloubka provaření, ale už byly odstraněny vady v kořeni. Ve svaru se opět objevily póry, ale už nejsou tak velké jako v prvním případě. Povrchová šířka svaru byla stanovena na 2,29 mm, po zúžení 1 mm a hloubka průvaru 4,19 mm. Geometrie svaru opět odpovídá předpokládanému tvaru při tomto typu svařování. Na povrchu došlo k lehkému utavení kovu, avšak není to tak velké ztenčení stěn.



Obr. 38 Výbrus vzorku č. 2

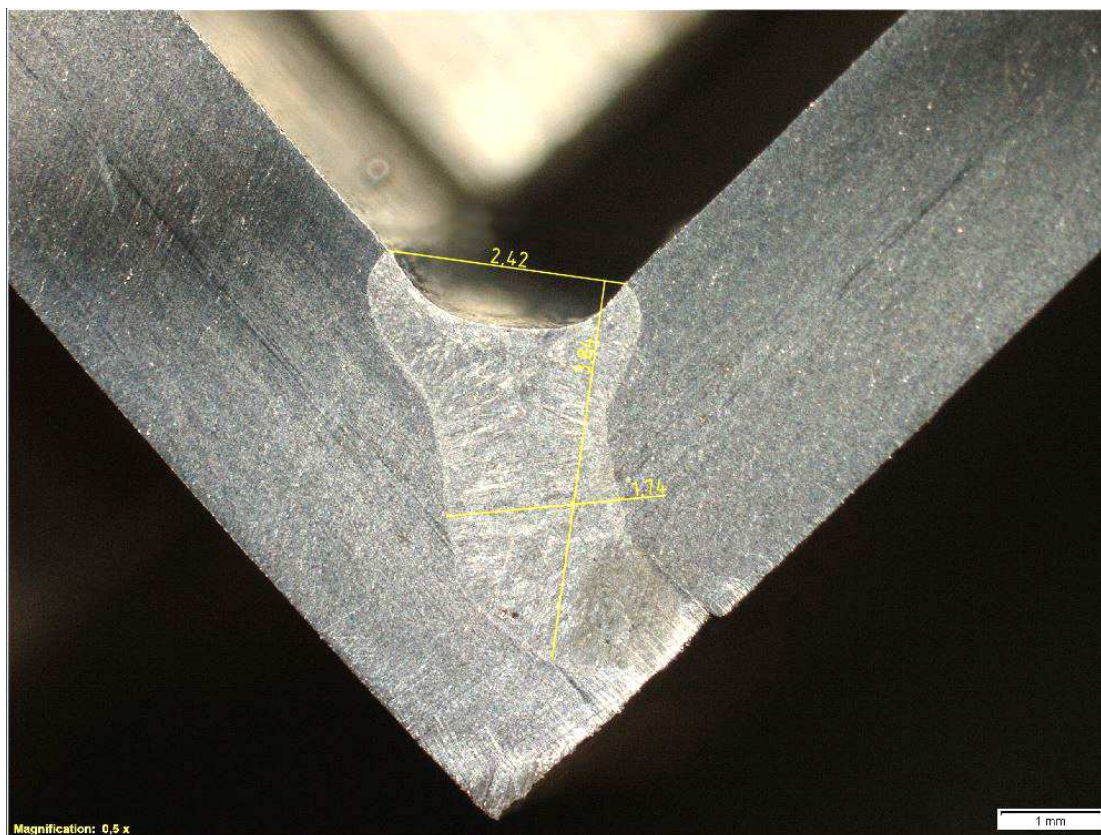
3.3 Vzorek č. 3

V tomto případě už bylo přidáno rozmítání svazku. Výkon laseru zůstal neměnně na 2000 W, rychlost na 15 m/s. Dalším nastaveným parametrem byl poloměr rozmítací kružnice a frekvence rozmítání. Poloměr byl 0,6 mm a frekvence 60 Hz. Po svaření (obr. 39) nebyla pozorována žádná zjevná odchylka v rozměrech na povrchu od vzorku č. 2. Úhel se z 90° smršťil na 88° a i zde není rozdíl oproti předešlému vzorku. Rozmítací kružnice tedy nejspíše měla příliš malý poloměr na to, aby se to více projevilo na povrchu svaru.



Obr. 39 Vzorek č. 3

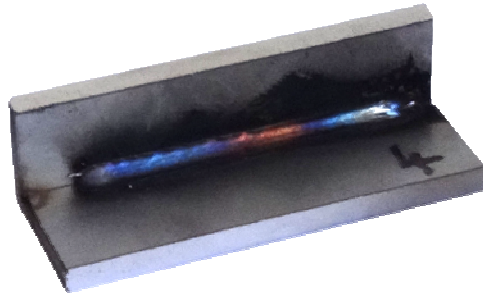
Na výbrusu viz obr. 40 byla změřena povrchová šířka svaru ve velikosti 2,42 mm, zúžená 1,74 mm a hloubka průvaru 3,84 mm. Šířka se mírně zvětšila oproti vzorku č. 2. V kořeni svaru se objevily velmi malé póry a došlo k zajímavému odklonu energie od osy svaru. Celkový tvar se mírně liší od klasického laserového svaru, a to zejména v tom, že se šířka svaru nezmenšuje s hloubkou tak moc jako u minulého vzorku. Na povrchu není patrné prakticky žádné utavení materiálu což je zřejmě důsledek správného nastavení dílce pod svařovací hlavou.



Obr. 40 Výbrus vzorku č. 3

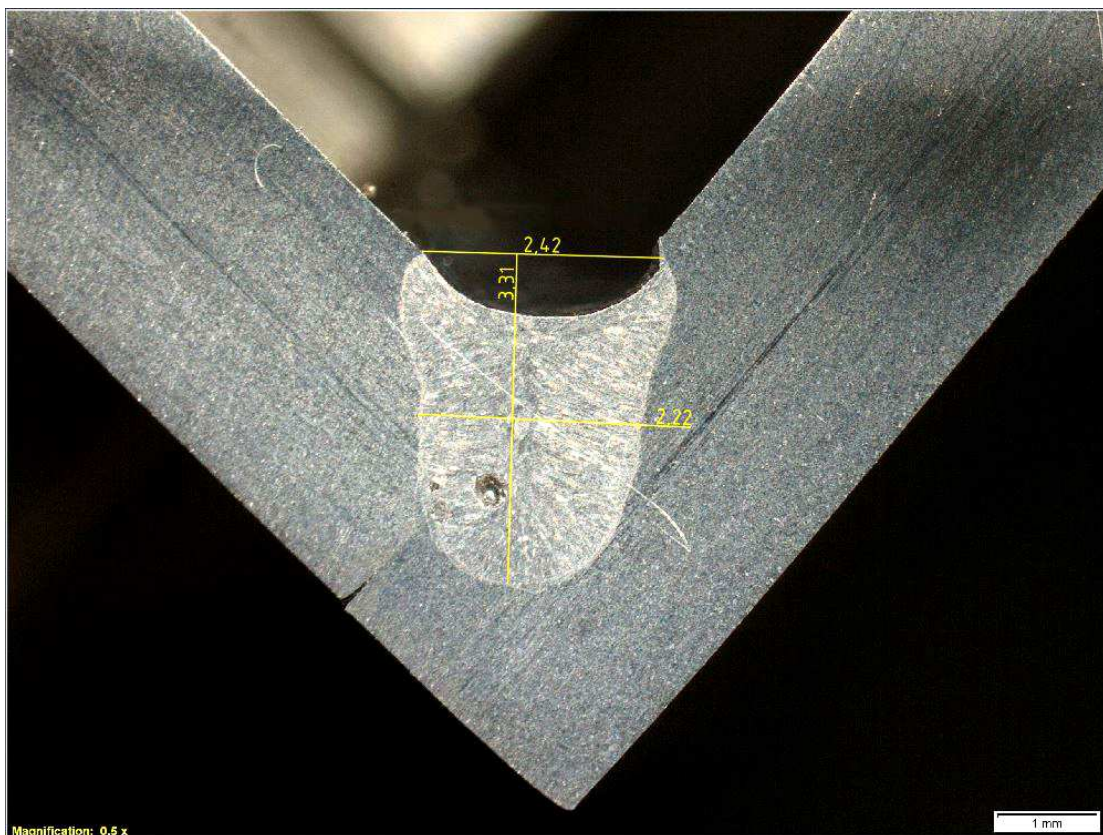
3.4 Vzorek č. 4

Pro svařování tohoto svaru byl poloměr rozmítací kružnice nastaven na 0,9 mm a frekvence rozmítání na 60 Hz. Výkon laseru byl stále 2000 W a rychlost 15 m/s. Na vyhotoveném svarku, který je zobrazen na obrázku 41, byla změřena změna úhlu z 90° na 85,25°. Tato deformace už je docela zásadní a při použití tohoto svaru v rámci konkrétní konstrukce by musely následovat opatření, jak jí zabránit nebo se jí následně zbavit. Vizuální kvalita svaru byla bez problémů a nebyly shledány žádné vady.



Obr. 41 Vzorek č. 4

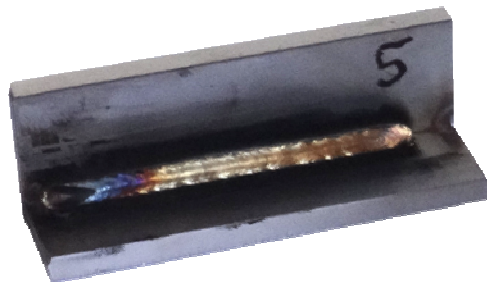
Při prozkoumání výbrusu (obr. 42) pod mikroskopem byla naměřena povrchová šířka svaru 2,42 mm, ve zúžení 2,22 mm a hloubka průvaru 3,31 mm. Šířka je tedy stejná jako u předchozího vzorku, ale hloubka se zmenšila o 0,5 mm. Ve spodní části svaru se opět vytvořily póry. Geometrie svaru se již velice liší od klasického tvaru, avšak v horní části stále dochází k náhlému zúžení, které je však plynulejší než u předchozích vzorků. Na povrchu svaru došlo k výraznému utavení pravého plechu, což způsobilo velké ztenčení stěny. Původ této vady nejspíše pochází z nepřesného nastavení vzorku před svařením.



Obr. 42 Výbrus vzorku č. 4

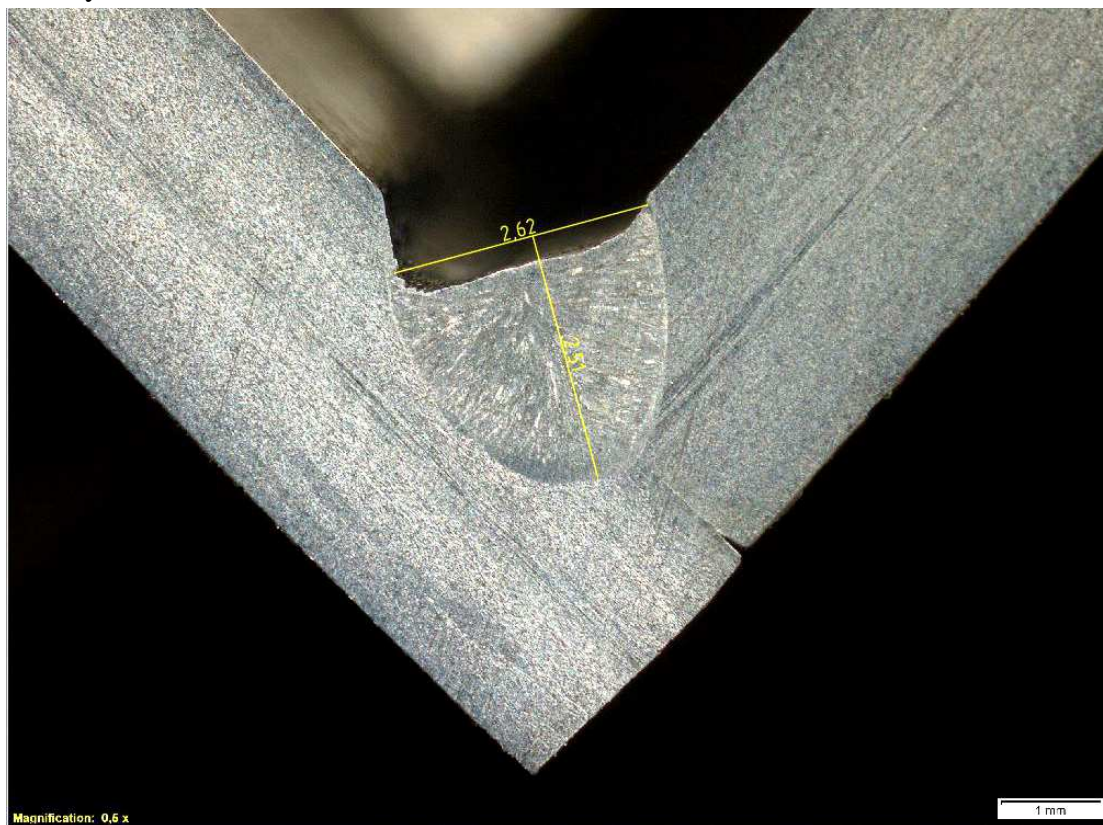
3.5 Vzorek č. 5

U tohoto svaru byla nastavena největší rozmítací kružnice, a to o poloměru 1,2 mm. Frekvence zůstala 60 Hz, výkon 2000 W a rychlost 15 m/s. Svařený dílec, viz obr. 43, utrpěl velkou úhlovou deformací o rozdíl $5,75^\circ$ mezi původním a výsledným úhlem. Tato deformace byla největší ze všech vzorků. Bylo to způsobeno šířkou působení paprsku, která při této velikosti kružnice byla už velmi značná. Svar byl na pohled širší než ostatní, avšak tato šířka nebyla konstantní a mírně kolísala. Jiné vady se při vizuální kontrole neobjevily.



Obr. 43 Vzorek č. 5

Povrchová šířka svaru byla 2,62 mm a hloubka průvaru 2,51 mm. Šířka po zúžení nebyla změřena, protože k němu nedošlo. Povrchová šířka je ovlivněna propadem na levé straně, což nejspíše způsobilo nepřesné upnutí pod svařovací hlavou, kdy paprsek dopadal více na jednu stranu než na druhou. Utavení má za důsledek ztenčení stěny o přibližně jednu pětinu původní tloušťky. Ve svarovém kovu se nevytvořily póry. Zlepšení ohledně pórovitosti je s velkou pravděpodobností zapříčiněno rozmítáním, kdy paprsek míchá se svarovou lázní a tím ovlivňuje její vlastnosti. Na výbrusu (obr. 44) je také patrná změna geometrie. Tvar svaru je zcela odlišný od laserového svaru.



Obr. 44 Výbrus vzorku č. 5

3.6 Shrnutí výsledků

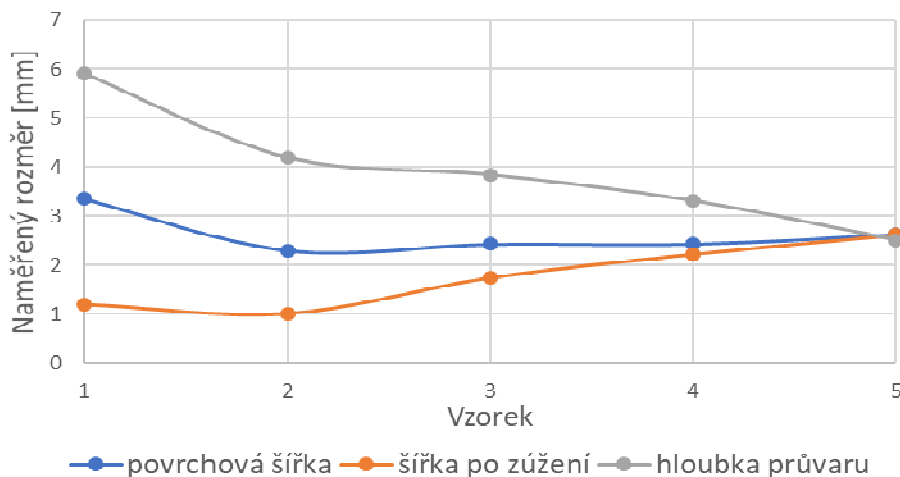
Všechny naměřené údaje o šířce a úhlové deformaci jsou pro větší přehlednost zaneseny do tabulky č. 5 do grafu (obr. 45). Povrchová šířka byla největší u prvního vzorku. Po zvýšení rychlosti se tento rozměr zmenšil a s rostoucím poloměrem rozmítací kružnice opět narůstal. Šířka po zúžení se chovala naprosto stejně, avšak postupný nárůst byl mnohem větší. Postupně se zmenšovala hloubka průvaru a vytrácelo se charakteristické zúžení v horní části svaru. První dva svary měly typický tvar pro laserové svařování v penetračním režimu. V dalších třech svarech byl postupný odklon od tohoto tvaru. Poslední vzorek vykazuje markantní odlišnosti. Naprosto zmizelo zúžení a celkový tvar spíše připomíná svar zhotovený některou z konvenčních metod.

Ve svarech jedna až čtyři se objevily póry, které nejspíše vznikly špatnými parametry keyhole. Zajímavé je, že se vytvořily vždy přibližně ve stejném místě. Další objevující se vadou bylo utavení jedné z ploch základního materiálu. Tento defekt se projevil obzvláště u čtvrtého a pátého vzorku. Z toho tedy vyplývá, že se zvětšujícím se poloměrem rozmítací kružnice, vzrůstá požadavek na přesnost nastavení dílce pod svařovací hlavu. Střed této kružnice by měl dopadat přesně do styku dvou plechů a oba plechy by měly teoreticky svírat s paprskem stejný úhel. Plech, který svírá s paprskem menší úhel, vstřebává jiné množství energie než druhý a může být díky tomu více nataven. Toto nastavení úhlů také ovlivní mnohonásobný odraz, který je nedílnou součástí při tvorbě vnitřního koutového svaru.

Na vzorcích bylo také pozorováno úhlové smrštění. V prvních třech případech byla tato deformace prakticky stejná. Největší změna úhlu proti původní hodnotě byla u posledního vzorku. Z výsledků je patrná souvislost tohoto jevu s utavením kovu. Čím větší utavení, tím více se vzorek zdeformoval. Díky tomu, že došlo ke ztenčení stěny, tak byl tento plech náchylnější na ohyb způsobený zahřátím, a to se následně projevilo ve výsledném úhlu.

Tab. 5 Parametry a výsledky svařování

Vzorek číslo	Svařovací rychlost [m/s]	Poloměr rozmítací kružnice [mm]	Frekvence rozmítání [Hz]	Úhel před svařením [°]	Úhel po svařením [°]	Šířka svaru na povrchu [mm]	Šířka svaru po zúžení [mm]	Hloubka průvaru [mm]
1	15	0	0	90	88	3,35	1,19	5,91
2	10	0	0	90	88	2,29	1	4,19
3	10	0,6	60	90	88	2,42	1,74	3,84
4	10	0,9	60	90	85,25	2,42	2,22	3,31
5	10	1,2	60	90	84,25	2,62	2,62	2,51



Obr. 45 Grafické zobrazení naměřených hodnot

4 ZÁVĚRY

Laserové svařování začíná být stále rozšířenější metoda spojování materiálů, a proto je důležité prozkoumat všechny možnosti této technologie. Nedílnou součástí všech svařovaných konstrukcí jsou koutové svary. Právě na tuto problematiku je zaměřena tato bakalářská práce, a to zejména na svařování vnitřních koutových svarů pomocí rozmítání laserového svazku.

Od rozmítání svazku se očekávala změna klasické geometrie laserového svaru. Pro ověření této domněnky byl proveden experiment, při kterém se zkoumala závislost geometrie na rozmítání paprsku. Tato teorie se potvrdila a opravdu došlo ke změně celkového tvaru. Při použití rozmítací kružnice s poloměrem o velikosti 1,2 mm zmizelo typické zúžení svaru v horní části a šířka se zmenšovala s přibývajícím hloubkou plynuleji a bez výrazných skokových změn. Jestli změna tvaru ovlivnila také mechanické vlastnosti spoje, nebylo zjištěno, neboť nebyly provedeny příslušné mechanické destruktivní zkoušky. Výzkum této vlastnosti nebyl cílem bakalářské práce.

Při svařování bylo zjištěno, že nebezpečí ztenčení plechů z důvodu odtavení jednoho z plechů je u tohoto způsobu svařování velké. Velmi záleží na přesném nastavení svařovaných dílců pod svařovací hlavou. Toto zjištění by bylo nutné potvrdit opakováním experimentu, avšak pokud by se tato teorie potvrdila, velice by to ovlivnilo použitelnost v praxi. Nutnost zajištění velmi přesného připravení a nastavení dílců před samotným svařením by byla jistě finančně, časově a také technologicky náročná. Dalším kritériem při zavedení této technologie do výroby je také volba svařovací hlavy. Na výběr jsou dvě základní možnosti. Jednou z nich je skenerová hlava, která je levnější a univerzálnější, avšak má velké rozměry. Tuto negativní vlastnost je nutno zvážit, protože se tato hlava nemusí vejít na všechna požadovaná místa. Druhou možností je speciální hlava pro rozmítání paprsku. Ta je oproti skenerové menší a lehčí a má tedy lepší dynamické vlastnosti. Nevýhodou je však vyšší cena.

Rozmítání svazku je tedy určitě v kombinaci s vnitřními koutovými svary zajímavá možnost spojování materiálů. Má svá specifika, která je nutno blíže prozkoumat, avšak pokud se vyřeší nebezpečí utavení ploch, tak je jistě použitelná v hromadné výrobě. Díky vysoké ceně svařovacích hlav je nutno zvážit návratnost této technologie. K tomuto problému je vždy nutno přistupovat s konkrétními daty a rozhodnout se buď pro tuto novou metodu nebo pro některou z konvenčních svařovacích metod.

Seznam použitých zdrojů [36]

1. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Robert BIELAK. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 118 s. ISBN 80-227-1425-9.
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.
3. *LASCAM* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-svarovani/>
4. *Blumenbecker* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.blumenbecker.com/pl-en/industrial-automation/industrial-robotics/laser-welding/>
5. FUKAMI, Kenichi a Keischi SETODA. Development of high-efficiency MIG-laser hybrid welding technology. *Welding International* [online]. Taylor & Francis Group, 2011, 27(2), 1-6 [cit. 2019-02-18]. DOI: 10.1080/09507116.2011.600008. ISSN 0950-7116. Dostupné z: <https://www-tandfonline-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/pdf/10.1080/09507116.2011.600008?needAccess=true>
6. *Miller* [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/mig-welding-the-basics-for-mild-steel>
7. *HBT-weld* [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.hbt-weld.cz/katalog/laser-hybrid-schweiskopf/>
8. MRŇA, Libor a Petr HORNÍK. Pokročilé metody laserového svařování. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2017, 8.3.2017, 2017(3). ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani.html>
9. *IPG Photonics* [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-heads/welding/d50-wobble-and-seam-tracking-head>
10. DULEY, Walter W. *Laser welding*. 1. New York: Wiley, 1999, 251 s. ISBN 04-712-4679-4.
11. *Direct Industry* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ii-vi-infrared/product-37313-749735.html>
12. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Megablog* [online]. 28.2.2013 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
13. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
14. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1) - princip laseru. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2012, 13.3.2012, 2012(3). ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
15. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY – ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *LAO* [online]. 15.3.2011 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

16. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2012, 11.4.2012, 2012(4). ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
17. ROUBÍČEK, Martin. Laserové svařování: ekonomika a kvalita. *Konstrukce*. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2006, 16. 5. 2006, 2006(2). ISSN 1803-8433. Dostupné také z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
18. MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2018, 7.2.2018, 2018(1). ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
19. MRŇA, Libor, Petr HORNÍK, Petr JEDLIČKA a Jan PAVELKA. Study of laser wobbling welding process through the radiation of plasma plume. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2017*. Mnichov, 2017. Dostupné také z: https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution236_final.pdf
20. *Megablog* [online]. 18. 4. 2014 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.megablog.cz/lasery/nova-rychla-skenerova-hlava-miniscan-od-raylase-jiz-k-dostani-u-megaflexu/attachment/shinei-hlava/>
21. *IPG Photonics* [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-heads/welding/d30-wobble-head>
22. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
23. BARTÁK, Jiří. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. *CWS ANB* [online]. 1.3.2012 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
24. *TWI* [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-typical-defects-in-laser-welds#ref2>
25. PASTOR, Mario, Hangyu ZHAO a Tarasankar DEBROY. Continuous wave-Nd: yttrium–aluminum–garnet laser welding of AM60B magnesium alloy. *Journal of Laser Applications* [online]. 2000, 12(3), 91-100 [cit. 2019-03-17]. DOI: 10.2351/1.521922. ISSN 1042 - 346X. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/252257736_Continuous_wave-Nd_Yttrium-aluminum-garnet_laser_welding_of_AM60B_magnesium_alloy
26. WEI, P. S., K. C. CHUANG a J. S. KU. Spiking and Humping Defects in Laser Welding. *Journal of physics D: applied physics* [online]. IOPScience, 2011, January 2011, 2011(44), 83-87 [cit. 2019-03-17]. DOI: 10.1115/IMECE2010-39513. ISBN 978-0-7918-4428-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267592977_Spiking_and_Humping_Defects_in_Laser_Welding
27. FABBRO, Rémy, Sonia SLIMANI, Frédéric COSTE a Francis BRIAND. *Analysis of the various melt pool hydrodynamic regimes observed during cw Nd-YAG deep penetration laser welding*. Laser Institute of America, 2007, 2007. DOI: 10.2351/1.5061093. ISBN 978-0-912035-88-8. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/287059486_Analysis_of_the_various_melt_pool_hydrodynamic_regimes_observed_during_CW_Nd-Yag_deep_penetration_laser_welding
28. *Bohdan Bolzano s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>

29. *Korozivzdorné oceli – vlastnosti*. Brusel: Euro Inox, 2002. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné také z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
30. *Techportal* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnzl00RA9x7p75N8MGgz73w
31. *Narran s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://narran.cz/zpetny-odraz-casty-duvod-poskozeni/>
32. *Thorlabs* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgroup/page9.cfm?objectgroup_id=10766
33. *IPG Photonics* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/208/Widget/Wobble+Process+Heads+Brochure+2018.pdf>
34. *Sintec Optronics* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.sintecoptronics.com/markinghead.asp>
35. *Trumpf* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
36. *CITACE PRO* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

Seznam použitých zkratek

Název	Jednotka	Popis
b	[mm]	Šířka svaru
h	[mm]	Hloubka svaru
MAG	[-]	Metal Aktiv Gas (svařování v aktivním plynu)
MIG	[-]	Metal Inert Gas (svařování v inertním plynu)
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklady svařování laserem	9
Obr. 2 T-spoj	10
Obr. 3 Vnitřní koutový svar	10
Obr. 4 Koutový svar MIG/MAG	10
Obr. 5 LaserHybrid svařovací hlava	10
Obr. 6 Hlava pro rozmítání svazku	11
Obr. 7 Rezonátor	12
Obr. 8 Fyzikální princip laseru	12
Obr. 9 Schéma Nd:YAG laseru	13
Obr. 10 Princip vláknového laseru	13
Obr. 11 Princip CO ₂ laseru	14
Obr. 12 Diodový laser	14
Obr. 13 Mechanismu svařování	15
Obr. 14 Princip svařování hlubokým průvarem	15
Obr. 15 Geometrie svaru při hlubokém průvaru	16
Obr. 16 Závislost geometrie na výkonu	16
Obr. 17 Charakteristický tvar impulzu Nd:YAG laseru	16
Obr. 18 Rozmítací křivky	17
Obr. 19 Trajektorie rozmítání kružnicí	17
Obr. 20 Skenerová hlav	18
Obr. 21 Schéma skenerové hlavy	18
Obr. 22 Rozmítací hlava	18
Obr. 23 Efektivní vzdálenost zaostření paprsku	19
Obr. 24 Vliv rozložení energie okolo osy na svar	20
Obr. 25 Trhlina ve svaru	20
Obr. 26 Póry ve svaru	21
Obr. 27 Zoubkování	21
Obr. 28 Humping	21
Obr. 29 Podpálení svaru	21
Obr. 30 Připravené plechy pro laserové svařování.....	22
Obr. 31 Svařovací sestava	22
Obr. 32 Svařené vzorky.....	22
Obr. 33 Řezačka Straus Labotom 5.....	23
Obr. 34 Předpokládaný tvar svaru po rozmítání svazku	23
Obr. 35 Vzorek č. 1	24
Obr. 36 Výbrus vzorku č. 1	24
Obr. 37 Vzorek č. 2	25
Obr. 38 Výbrus vzorku č. 2	25
Obr. 39 Vzorek č. 3	26
Obr. 40 Výbrus vzorku č. 3	26
Obr. 41 Vzorek č. 4	27
Obr. 42 Výbrus vzorku č. 4	27
Obr. 43 Vzorek č. 5	28
Obr. 44 Výbrus vzorku č. 5	28
Obr. 45 Grafické zobrazení naměřených hodnot.....	29

Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení [hm. %]	11
Tab. 2 Druhy laserů používaných pro svařování	13
Tab. 3 Svařitelnost materiálů laserovým paprskem	19
Tab. 4 Leptací směs.....	23
Tab. 5 Parametry a výsledky svařování	29

Seznam příloh




Příloha 1	Atest použitého materiálu
-----------	---------------------------

Příloha 1 – Atest použitého materiálu



Certificate No. / Zeugnis Nr. / N° du certificat: **464602/001**
 Page / Seite / Page: **1 (01)**
 Date / Datum / Date: **06.02.2019**

INSPECTION CERTIFICATE 3.1
DIN EN 10204 3.1

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison												
Requirements, Anforderungen, Exigences EN 10088-4:2009 AD 2000 W2, W10 & EN 10028-7:2016 ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2017		Our Order No. / Unser Auftrag Nr. / Notre commande n° 300511408	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande 87011397									
Product, Erzeugnisform, Produit COIL, STAINLESS STEEL		Mark of Manufacturer / Zeichen des Lieferwerkes / Signe de producteur outokumpu	Process / Erichmelzungsart / Mode de fusion AOD									
Grade, Werkstoff, Nuance 1.4307 1.4301 TYPE 304L		Tolerances / Toleranzen, Tolérances EN ISO 9445-2										
Marking, Kennzeichnung, Marquage 1.4307 2B		Marks, Versandzeichen, Marques										
Line / Reihe / Ligne 1	Item / Position / Poste 6 91172 2	Charge-test No. / Schmelze-Probe Nr. / Coulée n° 3,0 X 1500 MM	Quantity / Stückzahl / Nombre 11500 KG 2B									
Weight, Gewicht, Poids 11500 KG 2B		Finish / Ausführung / Fini EN/ASTM  14 0045-CER-0567										
Charge no. / Schmelze Nr. / Coulée n° 91172	Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimique											
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %	AL %			
	0,020	0,45	1,50	0,035	0,001	18,2	8,1	0,050	0,002			
Line / Reihe / Ligne 1	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques							Tensile test, Zugversuch, Essai de traction				
	Sample ID / Proben ID / Échantillon	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	%	Hardness / Härte, Dureté / HBW	ISO 6892-1:2009 A224 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION			
	01	298	341	632	56	52		182	APPROVED ACC. TO AD2000-W0 WITH VERIFICATION OF THE UNIFORMITY OVER THE STRIP LENGTH. CERTIFIED ACC. TO PED 2014/68/EU BY TUV NORD REG. NO. 0045. DOPS ACC. TO CPR AVAILABLE ON THE WEB PAGE BY STEEL NUMBER			
	02	289	332	628	58	55		178				
Identify test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification		OK		OK		OK						
Size, Abmessungen, Dimensions		OK		OK		OK						
Surface, Oberfläche, Surface		OK		OK		OK		We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellanfrage entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.				
Test of intergran. coros., Prüfung auf interkrit. Korros., Test de coros. intercrit.		OK		OK		OK						
EN ISO 3651-2 A: OK ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2017 TYPE 304 EN 10088-2:2014/1.4307, 1.4301 HEAT TREATMENT 1060 C BEND TEST OK								This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.				
								Outokumpu Stainless Oy  Authorized inspector / Werkstoffverständiger / Inspecteur autorisé LARI NISSINEN FI-86490 Torno, Finland Tel. +358 16 4521, email cert@cert.torno@outokumpu.com, www.outokumpu.com Domicile: Torno, Finland, Business Identity Code 0833315-9				