



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM PÓROVITOSTI SVARU HLINÍKOVÉ SLITINY ŘADY 5000 PŘI HYBRIDNÍM SVAŘOVÁNÍ LASER-TIG

STUDY WELD POROSITY ALUMINUM ALLOY 5000 SERIES DURING HYBRID WELDING LASER-TIG

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Drápela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Petr Drápela**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Studium pórovitosti svaru hliníkové slitiny řady 5000 při hybridním svařování Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studium porozity sváru v závislosti na procesních parametrech při hybridním svařování typu Laser – TIG hliníkových slitin řady 5000.

Cíle bakalářské práce:

- Osvojit si technologii laserového a hybridního svařování.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si problematiku svařování hliníku.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.

Seznam doporučené literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

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

MICHNA Š. a kol., Encyklopedie hliníku, Adin 2005, ISBN 80-89041-88-4

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

DRÁPELA Petr: Studium pórovitosti svaru hliníkové slitiny řady 5000 při hybridním svařování Laser-TIG

Práce je zaměřena na studium pórovitosti svaru hliníkových slitin vytvořených technologií laser-TIG. Teoretická část se zabývá studiem metod svařování a jejich parametrů, možnostech a využití. Nejprve jsou metody zkoumány odděleně, poté jako celek. Na konci teoretické části práce je shrnuta problematika svařování hliníkových slitin a základní vlastnosti. V experimentální části je vyhotoveno jedenáct zkušebních svarů na plechu ze slitiny hliníku EN AW-5754 H111, tl.5 mm. Následně jsou změřeny rozměry svarů, ze kterých jsou vyhotoveny závislosti na svařovacím proudu a vneseném teple Q . Poté je provedena analýza svarových vad a výsledné zhodnocení optimálních svařovacích parametrů.

Klíčová slova: Laser, TIG, hybridní svařování, keyhole, laser-TIG, hliníkové slitiny

ABSTRACT

DRÁPELA Petr: Study weld porosity aluminium alloy 5000 series during hybrid welding laser-TIG

This bachelor thesis is aimed on studying weld porosity of aluminium alloys made by laser-TIG technology. Theoretical part deals with welding methods and their parameters, capabilities and usage. Methods are investigated separately then as a unit. At the end of the theoretical part there is summary about welding aluminium alloys and their properties. In experimental part it is made eleven testing welds on sheet metal from aluminium alloy EN AW-5754 H111, thickness 5 mm. After this sizes of welds are measured. From these sizes dependences welding current to input heat Q are made. Final part concerns analysis of welding defects and final evaluation optimum welding parameters.

Key words: laser, TIG, hybrid welding, keyhole, Laser-TIG, alluminum alloy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁPELA, Petr. *Studium pórovitosti svaru hliníkové slitiny řady 5000 při hybridním svařování Laser-TIG*. Brno, 2017. 48s, 3 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

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 26.5.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Největší poděkování patří rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	Str.
ÚVOD	9
1 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ	10
1.1 Základní princip laseru	10
1.1.1 Vlastnosti laserového záření	10
1.2 Rozdělení typů laserů v průmyslu	11
1.2.1 Nd: YAG laser	12
1.2.2 Diskový laser	12
1.2.3 Vláknový laser	13
1.2.4 CO ₂ laser	13
1.2.5 Diodový laser	14
1.3 Využití laseru v průmyslu	14
1.3.1 Řezání laserem	16
1.3.2 Značení a popisování	17
1.3.3 Gravírování	17
1.3.4 Vrtání	17
1.4 Princip laserového svařování	18
1.4.1 Kondukční režim svařování	18
1.4.2 Penetrační režim svařování	18
1.5 Výhody a nevýhody laserového svařování	19
2 TIG SVAŘOVÁNÍ	20
2.1 Svařovací zdroje	21
2.2 Svařovací metody	21
2.2.1 Svařování stejnosměrným proudem	22
2.2.2 Svařování střídavým proudem	23
2.2.3 Svařování impulsním proudem	24
2.2.4 Čistící efekt	25
2.3 Výhody a nevýhody TIG svařování	25

3 HYBRIDNÍ SVAŘOVÁNÍ LASER-TIG	26
3.1 Základní konfigurace Laser-TIG	26
3.2 Parametry Laser-TIG	26
3.3 Výhody a nevýhody Laser-TIG	31
4 HLINÍKOVÉ SLITINY	32
4.1 Vlastnosti hliníkových slitin	32
4.2 Svařitelnost hliníkových slitin	33
4.2.1 Svarové vady a defekty	33
5 EXPERIMENT	36
5.1 Svařování vzorků	36
5.2 Metalografické výbrusy	38
5.3 Závislost rozměrů svarů na svařovacím proudu TIG	39
5.4 Závislost plochy svaru na vneseném teple	41
5.5 Analýza svarových vad	43
5.6 Vizualní kontrola svaru	46
6 ZÁVĚR	48
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1]

Zvyšující se nároky na omezení spotřeby paliva a tvorbu emisí, nutí automobilový průmysl ke snižování hmotnosti vozidel. To úzce souvisí s dimenzováním základních komponentů, jako je motor, brzdy a převodové ústrojí. Se zmenšující se hmotností vozidla klesá i potřebná energie k jeho rozjezdu, tudíž i menší spotřeba paliva. V posledních letech se snižování hmotnosti provádí použitím slitin neželezných kovů (především hliník) na karosérie. Avšak se zmenšující se hmotností vozidla musí být dodrženy bezpečnostní normy, tzn. velké nároky na mechanické vlastnosti spoje. S výrobou je neodmyslitelně spojené ekonomické hledisko a efektivita výroby.

Těmto hlediskům vyhovuje technologie laserového svařování, která se vyznačuje vysokou svařovací rychlostí. Nicméně pro svařování hliníkových slitin není dostačující, jelikož dochází k tvorbě vysoké koncentrace pórovitosti ve svarech. Tato vada významně snižuje mechanické vlastnosti svarového spoje.

Pro svařování karoserií z hliníkových slitin se jeví jako vhodná metoda hybridní svařování laser-TIG, která úspěšně potlačuje pórovitost a zvyšuje kvalitu svarového spoje. U této metody, stejně jako laser, předpokládáme vhodnost pro sériovou hromadnou výrobu, zejména v automobilovém průmyslu.

Vzhledem k velkému množství parametrů, je nastavení optimálního stabilního svařovacího procesu velmi obtížné. Tudíž tato metoda vyžaduje důkladné probádání, abychom byli schopni ji naplno využívat.



Obr. 1 Laserové svařování karosérie na montážní lince Fiat Fiorino. [1]

1 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [2], [3], [5], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [20], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [36], [37], [38], [44], [45], [46]

Laserové svařování patří k nejproduktivnějším a nejmodernějším metodám svařování bez přídavného materiálu. Zejména pro možnost svařování různých typů materiálů, jako je konstrukční a nerezová ocel, měď, titan a hliník. Hlavní preference laserového svařování je vysoká svařovací rychlost, vyšší hloubka průvaru, přesnost, kvalita svaru a významně nižší tepelně ovlivněná oblast. Snadná realizace automatizované výroby a možnost online kontroly svařovacího procesu, činí laserové svařování jednu z nejpoužívanějších metod svařování v automobilovém průmyslu.

Tab. 1 Porovnání parametrů svařovacích metod. [38]

Metoda svařování	Hustota energie [W/cm ²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m/mm]
Laser	10 ⁷ – 10 ⁹	10	0,1 - 0,5	10
Plamen	10 ³	3	3	0,01
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5 - 3
Plasma	10 ⁶	6	1	0,5 - 5
El. Paprsek	10 ⁸	50	0,03	0,5 - 5

1.1 Základní princip laseru [32], [46], [36]

Základní principy činnosti laseru jsou obsaženy v samotném názvu, který vznikl z počátečních písmen anglického popisu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření. Konstrukce laseru vychází ze základních zákonů kvantové elektroniky a podstaty stimulované emise záření, které byli definovány na začátku 20. století. (pány M.Planc, N. Bohr, A.Einstein)

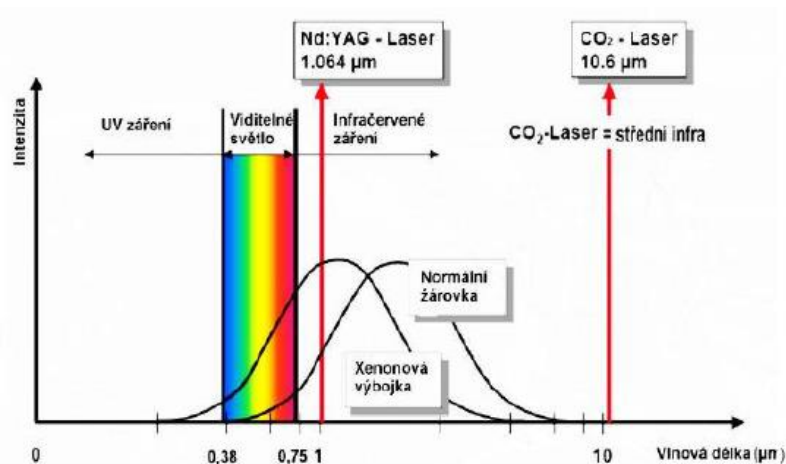
1.1.1 Vlastnosti laserového záření [32], [46]

Laserové záření se odlišuje od ostatních zdrojů záření třemi základními vlastnostmi.

Laserový svazek je:

- Kolimovaný – minimální rozbíhavost svazku
- Monochromatický – generované fotony mají stejnou frekvenci
- Koherentní – generované fotony jsou ve stejné fázi

Díky výše uvedeným vlastnostem má laser velké spektrum využití v různých odvětvích. Další důležitou vlastností je fokusace (zaostřování) paprsku do malého bodu. Po fokusaci se rapidně zvýší plošná hustota energie, která je nezbytná pro průmyslové aplikace – svařování, řezání, gravírování atd. Na obrázku 2 je znázorněné elektromagnetické záření laseru a ostatních zdrojů světla.



Obr. 2 Porovnání elektromagnetický záření zdroje světla. [46]

1.2 Rozdělení typů laserů v průmyslu [3], [9], [20], [21], [23], [24], [26], [27], [29], [32], [36], [44]

V současné době je používáno pět typů laserů pro průmyslové aplikace, tyto aplikace jsou považovány jako nekonvenční. Dílčí typy jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 2), kde jsou následně rozděleny podle typu buzení a pracovního režimu. U jednotlivých typů laseru jsou uvedeny možnosti použití v průmyslových aplikacích, jako jsou řezání, svařování, značení, gravírování atd. Každý typ může být provozován pulzním nebo kontinuálním režimem a snadno se integruje do robotických výrobních linek.

Tab. 2 Porovnání parametrů typů laserů. [29]

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Efektivita	Režim	Výkon/Energie	Typické aplikace	Údržba	Životnost [h]
Nd:YAG	1064	LD	~7%	CW	až 6kW	Ř, S	ano	~10 000
				pulsní	~100W	Z, G		~1000
		lampy	~3%	pulsní	~600W	S, V		
CO ₂	10 600	RF	~10%	CW/pulsní	10-250W	Z, G, Ř	ano	~20 000
		EL	~25%		až 5kW	Ř, S		
Diskový	1070	LD	~15%	CW	až 16 kW	Ř, S	ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30%	CW	až 80 kW	Ř, S	ne	~100 000
				QCW	~1,2kW	Z, G, M		
				pulsní	~100W	Z, G, M		
Diodový	808 - 980	EL	~60%	CW	až 10kW	S, K, N	ne	~15 000

Vysvětlivky:

Buzení:

LD – laserové diody

RD – radio-frekvenčně

EL – elektricky (výboj, proud)

Typické aplikace:

G – gravírování

K – kalení

M – mikro obrábění

N – nanášení vrstev

Režim:

CW – kontinuální

QCW – kvazi-kontinuální

Ř – řezání

S – svařování

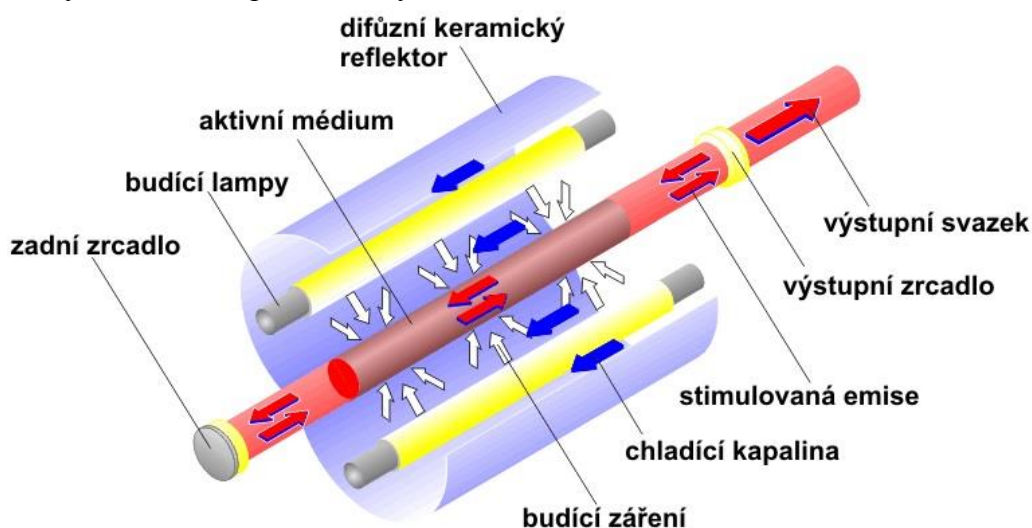
Z – značení

1.2.1 Nd: YAG laser [20], [29], [32]

Historicky nejstarší typ pevnolátkového laseru využívaného pro průmyslovou aplikaci. Aktivní prostředí tvoří tyčinka z YAG (yttrium aluminium granát) krystalu, která je dopovaná ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Princip laseru je znázorněn na obrázku 3. K buzení laseru se používají laserové diody (DPSS – *diode pumped solid state*) nebo xenonové výbojky (LPSS – *lamp pumped solid state*).

U LPSS Nd: YAG laserů je potřebné chlazení vodou, jelikož dochází k značnému zahřívání xenonové výbojky z důvodu malé účinnosti přeměny energií. Z důvodu chlazení výbojky se zvyšují i provozní náklady. Nejčastěji je využíván pulsní režim, obzvláště pro svařování a vrtání.

DPSS Nd: YAG mají oproti Nd: YAG laseru buzeného výbojkami větší účinnost přeměny elektrické energie na světelnou. Na úkor této vlastnosti jejich používání rapidně klesá a jsou zaměňovány za vláknové pulsní lasery.

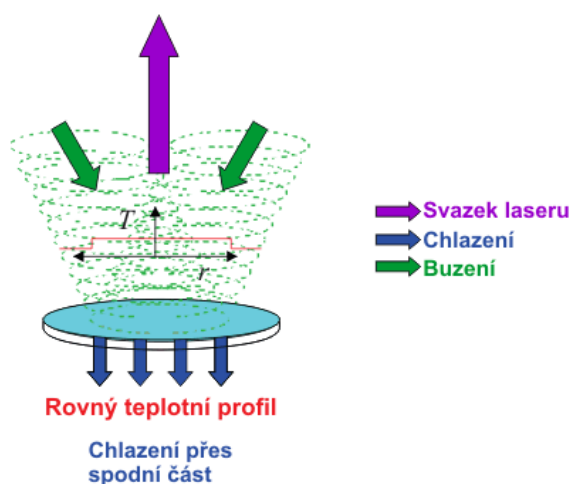


Obr. 3 Princip Nd: YAG laseru. [29]

1.2.2 Diskový laser [3], [29]

Princip (Obr.4) je identický s laserem Nd:YAG, až na tvar aktivního prostředí, které je tvořeno tenkým diskem ($\varnothing 10$ mm, tl. 0,25 mm).

Vyznačuje se vysokým výkonem (až 16kW), který je zajišťován stejným tepelným charakterem na celém disku. Především je používán pro aplikace, kde je zapotřebí vysokých výkonů – svařování a řezání.



Obr. 4 Princip diskového laseru. [29]

1.2.3 Vláknový laser [9], [24], [29], [44]

Jedná se o nejmodernější typ pevnolátkového laseru, kde aktivní prostředí je tvořeno dlouhým (až několik metrů) optickým vláknem (průměr 50-300 μm), které je dopováno yterbiem. Výstupní paprsek je tvořen z několika paprsků, které jsou buzeny z laserových diod spojené multimódovou spojkou. Následně procházejí Braggovou mřížkou a jsou vyvázané optickým kolimátorem. Tato mřížka plní funkci zrcadla. Princip vláknového laseru je znázorněn na obrázku 5.

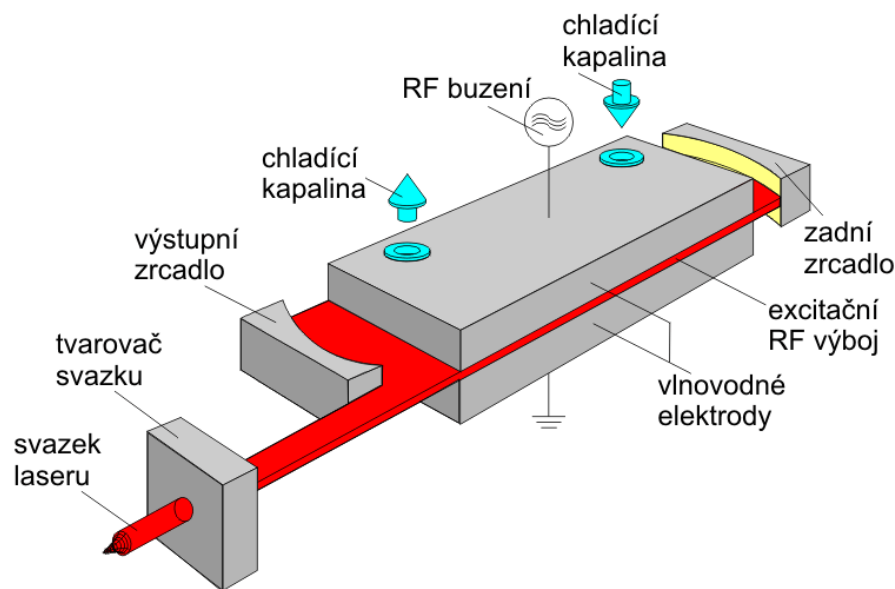
Hlavní výhodou jsou malé provozní náklady, které jsou zapříčiněné nižšími požadavky na chlazení okruhu, dlouhou životností budících diod a vysokou účinností (tzn. nízká spotřeba el. energie). Další výhody jsou malé rozměry a prakticky žádné požadavky na údržbu.



Obr. 5 Princip vláknového laseru. [29]

1.2.4 CO₂ laser [29], [36]

Aktivní prostředí výkonového plynového CO₂ laseru je tvořeno směsí plynů helia, dusíku a oxidu dusičného nejčastěji v poměru 82:13,5:4,5. Můžeme je rozdělit dle způsobu buzení: radio-frekvenčně nebo elektrickým výbojem, dále dle uzavřenosti rezonátoru-hermeticky uzavřený a na tzv. průtočné lasery. Pro vysoké výkony (cca 10kW) je nutné zajistit nepřetržitý proud plynu skrze rezonátor – tuto funkci splňují průtočné lasery. Výkon CO₂ laseru se pohybuje v intervalu 0,5 až 20kW, nicméně jeho maximální hodnota může dosáhnout až 200kW.



Obr. 6 Princip CO₂ laseru. [29]

Nejčastěji používaný CO₂ laser je difuzně chlazený (Obr. 6) do deskových elektrod. Aktivní plyn je buzen rádio-frekvenčně a cirkuluje mezi dvěma elektrodami. Díky velké difuzní ploše elektrod, které jsou chlazené průtokem vody, je chlazení velmi efektivní a není potřebná nucená cirkulace plynu. Přednosti tohoto laseru jsou zejména nízké provozní náklady a vysoká spolehlivost. Velkou nevýhodou je nutnost použití zrcadel pro vedení svazku, oproti optickým vláknům je toto vedení komplikované a vyžaduje zvýšenou pozornost na čistotu a kalibraci zrcadel.

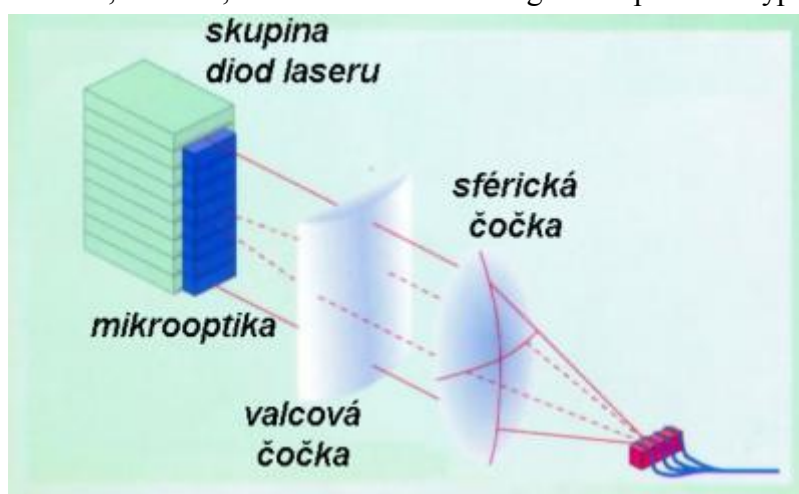
Aplikace CO₂ laseru je rozmanitá, při nižších výkonech (do 1,5 kW) je využíván pro popisování, gravírování a řezání nekovů (plasty, sklo atd.). Při zvýšení výkonu (cca 20kW) lze CO₂ laser využít na svařování a řezání kovů.

1.2.5 Diodový laser [21], [23]

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších laserů, může být také označován jako polovodičový laser. Podstatou tohoto typu laseru, je laserová dioda malých rozměrů. Aktivní prostředí je tvořeno polovodičovým materiálem, kde aktivními částicemi jsou nerovnovážné elektrony a díry. Tyto částice mohou být injektovány. Princip diodového laseru je znázorněn na obrázku 7.

Hlavní výhodou je vysoká účinnost diody (až 50%) a snadná regulace výkonu, který lze měnit změnou elektrického proudu. Skrze velmi malé rozměry diody dochází k vysoké rozbíhavosti vytvářeného záření.

Diodový laser nachází uplatnění zejména ve výpočetní technice a pro některé průmyslové aplikace, jako je: řezání, značení, svařování a v technologiích Rapid Prototyping.



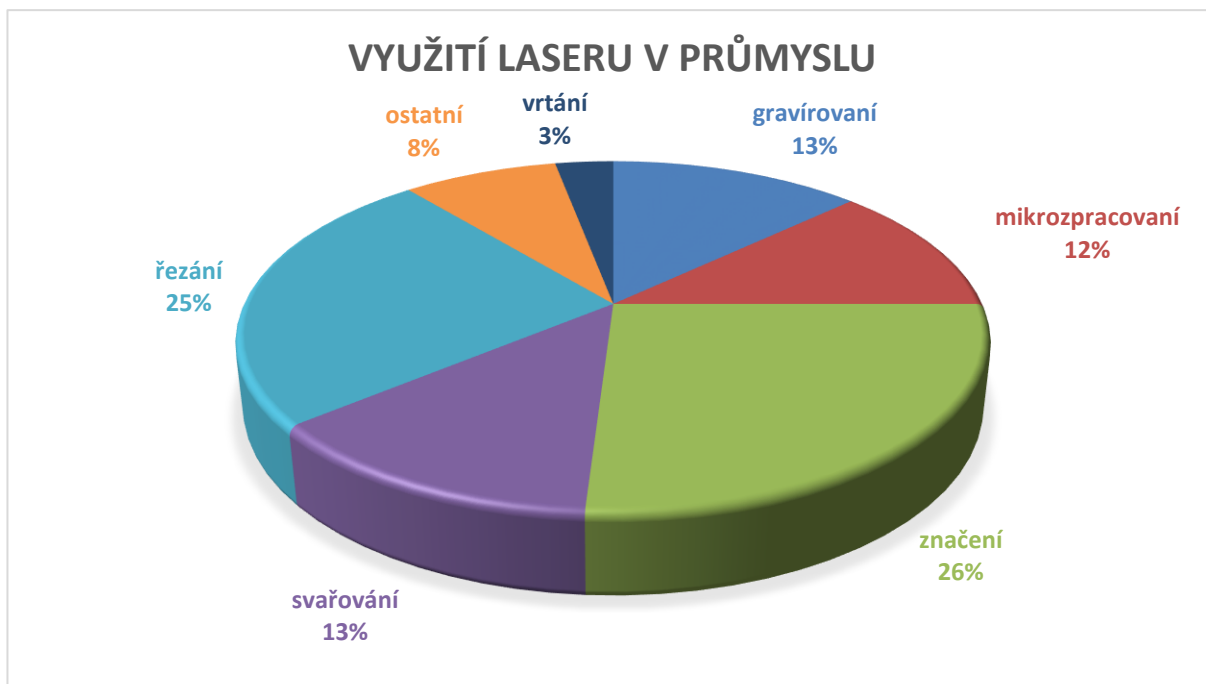
Obr. 7 Princip diodového laseru. [21]

1.3 Využití laseru v průmyslu [2], [10], [11], [12], [16], [21], [25], [28], [30], [37], [45]

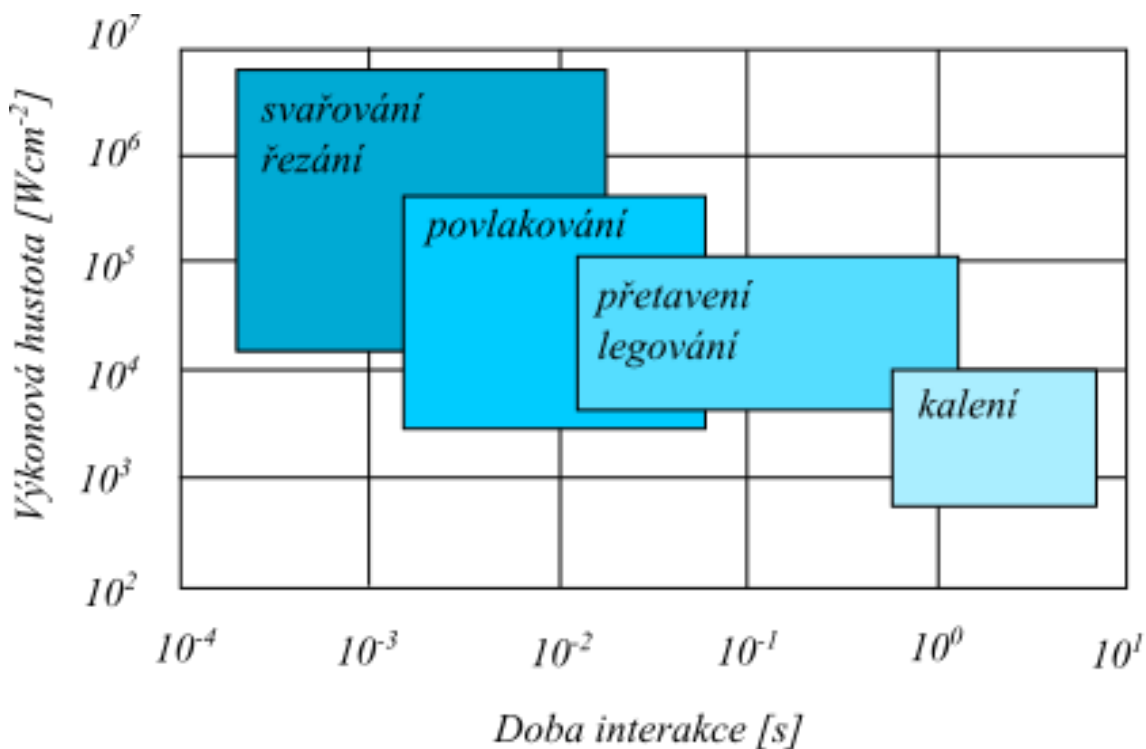
Laser má široké uplatnění v mnoha odvětvích, jako je např. medicína, vojenský průmysl, měřicí a výpočetní technika, mikroelektronika a průmysl. Každý typ laseru je vhodný pro určitou aplikaci ve výše zmiňovaných odvětvích.

Mezi nejvýznamnější aplikace v průmyslu je značení materiálu, řezání laserem, svařování, gravírování, mikro-zpracování, kalení a vrtání. Za pomoci laserového zařízení lze zefektivňovat výrobu, a tudíž i snižovat náklady. Současné laserové systémy jsou téměř bezporuchové a vysoce stabilní.

Na obrázku 8 je znázorněn graf procentuálního využití jednotlivých odvětvích v průmyslu, který je doplněn rozdělením aplikací dle procesních parametrů (obr. 9).



Obr. 8 Graf využití laserů v průmyslu. [2]



Obr. 9 Graf rozdělení aplikací laserového svazku dle pracovních parametrů. [21]

1.3.1 Řezání laserem [12], [21], [28], [30], [37]

Laserové řezání je jedna z nejrozšířenějších průmyslových aplikací laserového svazku. Jedná se o technologii tepelného dělení materiálu, kterou lze zpracovávat materiál o tloušťce až 20 mm. Využívá se zejména u materiálů s malou tepelnou vodivostí. Nejpoužívanějším typem řezacích laserů jsou CO₂ lasery s výkonem do 15kW.

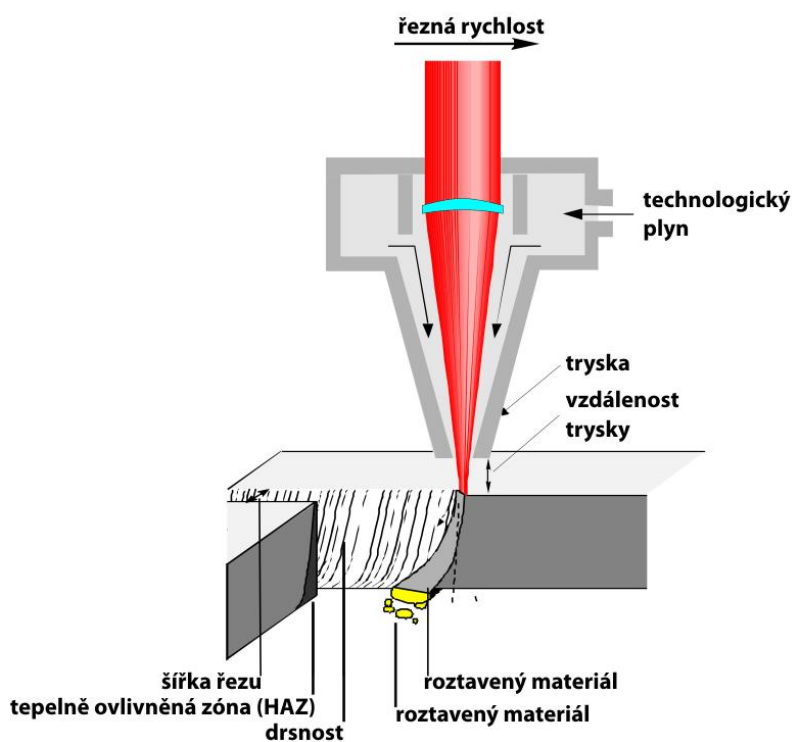
Princip této metody (obr. 10), ostatně jako u většiny laserových procesů, je založen na vysoké hustotě výkonu. Po dopadu svazku je materiál rychle ohříván, následně nataven a poté dochází k odpaření. Nedílnou součástí řezacího procesu jsou asistenční (řezací) plyny, které odstraňují taveninu, oxidy a výpary. Nejběžněji používaný asistenční plyn je kyslík nebo dusík, na speciální materiály je využíván argon.

Řezání laserem je možné rozdělit na tři typy (režimy): sublimační, tavné a pomocí pálení.

- Sublimační – materiál je odpařován
- Tavné – materiál je nataven a následně vyfouknut asistenčním plynem
- Pálení – materiál je zahřát na zápalnou teplotu, za pomoci reaktivního plynu (nejčastěji kyslík) dojde k zapálení a následně je vzniklá struska vyfouknuta asistenčním plynem

Výhody řezání laserem:

- Kolmý řez
- Vysoká řezná rychlost
- Přesnost
- Malá tepelně ovlivněná oblast

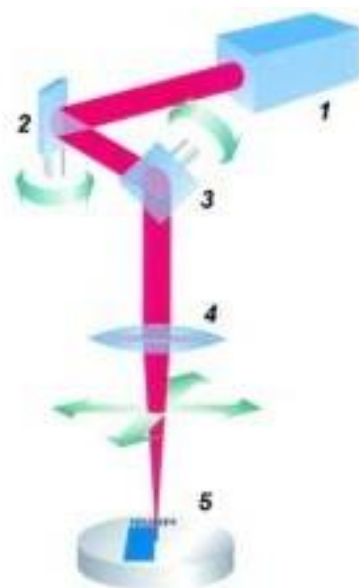


Obr. 10 Řezání laserem. [30]

1.3.2 Značení a popisování [11], [21]

Značení a popisování pomocí laserového paprsku je jednou z nejpoužívanějších metod v této oblasti. Svými vlastnostmi předčí všechny doposud používané konvenční metody (ražení, sítotisk, mechanické rytí apod.). Tuto metodu lze využít pro téměř všechny materiály: ocel, litina, zlato, guma, papír, dřevo, slitiny hliníku, bronzu, titanu atd.

Laserový svazek tepelně působí na značný materiál, a tím dochází k odpařování materiálu anebo k povrchovému kalení, které mění vizuální vzhled. Existují dvě metody použití této technologie, a to popis přes šablonu nebo pomocí vychylování paprsku. Prvně zmiňovaná technologie je spíše na ústupu. Principy metody pomocí vychylování paprsku je znázorněna na obrázku obr. 11.



- 1 – laser 2, 3 – vychylovací zrcadla
4 – objektiv 5 – značený materiál

Obr. 11 Princip značení laserem. [21]

1.3.3 Gravírování [10], [21]

Laserové gravírování je založené na stejném principu jako značení a popisování materiálu laserem. Liší se pouze hloubkou úběru materiálu, která je až několik milimetrů. Používá se pro tvorbu reliéfu, jednoduchých i komplikovaných, zejména do kalených ocelí, dřeva a gumy.

Výhody laserového gravírování je nesmazatelnost, odolnost a trvanlivost výsledného reliéfu. Typ používaných laserů se liší dle gravírovaného materiálu, pro kovové a keramické materiály se používá Nd:YAG, pro gumu a dřevo je vyhovující CO₂ laser.



Obr. 12 Příklady gravírovaných součástí. [21]

1.3.4 Vrtání [16], [21]

Během procesu vrtání laserem je materiál odstraňován odpařováním. Vrtání laserem vyžaduje vysokou intenzitu svazku (více než pro svařování), a to lze dosáhnout použitím pulsních laserů s krátkou dobou pulzu (pod 1ms). Laserem lze vrtat několika způsoby: jednotlivými pulzy, opakovanými pulzy, vyřezáváním díry a laserovou erozí. Je možno vrtat otvory o průměrech 10 až 100 mm do hloubky až 50 mm. Se zvětšující se hloubkou vrtaného otvoru, se zvětšuje geometrická odchylka.

Hlavní výhodou této technologie je vrtání malých otvorů v místech, kde je to pro ostatní technologie náročné či dokonce nemožné. Tuto metodu lze využívat pro většinu přírodních materiálů a plastů – kovy, keramika, textile, dřevo, sklo a plasty.

1.4 Princip laserového svařování [5], [8], [13], [31], [38]

Během působení laserového paprsku na povrch materiálu, dochází k částečné absorpci energie laserového záření a následnému zvyšování teploty v místě styku. Tento dynamický tepelný proces může způsobit natavení anebo odpaření materiálu.

Díky těmto dějům můžeme laserové svařování rozdělit na dva režimy:

- Kondukční režim – dochází pouze k natavení materiálu
- Penetrační režim – dochází k odpaření materiálu

Tyto dva režimy se odlišují zejména svojí aplikací a plošnou hustotou výkonu laseru.

1.4.1 Kondukční režim svařování [8], [13], [31], [38]

V průběhu kondukčního svařování (obr. 13) je energie šířena v materiálu pouze kondukcí tepla. Plošná hustota výkonu laseru se pohybuje v řádech 10^6 W.cm^{-2} a nedochází k významnému odpařování materiálu. Tato metoda se vyznačuje malou hloubkou svaru, která se pohybuje v intervalu desetin milimetru. Na úkor malé hloubce průvaru je rychlost svařování vyšší, tudíž pro aplikace, kde je rychlost přednější před úzkým průvarem, je tato metoda vhodnější.

Tato metoda je zejména používána pro svařování transparentních plastů, při které je navíc používána absorpční látka. Tato absorpční látka je aplikována na hranici svařovaných plastů a zajišťuje pohlcení energie laserového svazku. Následně vzniklé teplo taví povrch svařovaných plastů a po skončení interakce laserového paprsku s materiálem vznikne svar. Při správném seřízení parametrů vzniká svar pouze na vnitřní straně, tudíž navenek je svar téměř neviditelný.

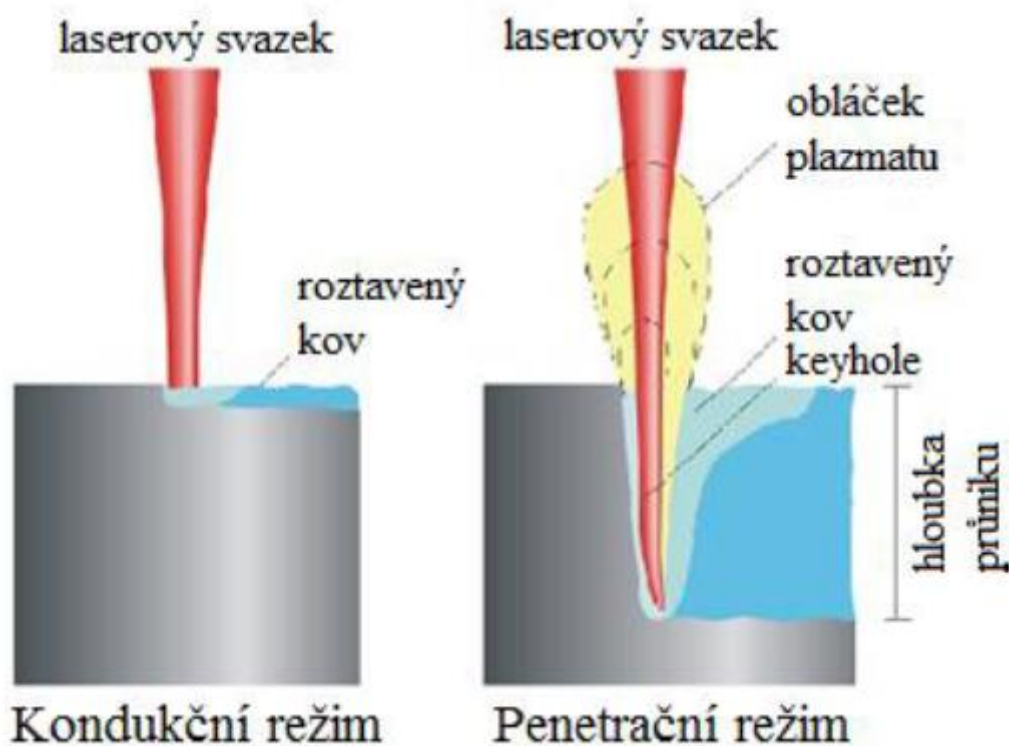
1.4.2 Penetrační režim svařování [5], [13], [31], [38]

Plošná hustota výkonu laseru je mnohonásobně vyšší jak u kondukčního režimu svařování, pohybuje se okolo 10^8 W.cm^{-2} . Laserový paprsek je fokusován do bodu, kde dochází k mohutné koncentraci energie. To způsobuje, že rychlost ohřevu materiálu značně převyšuje odvod tepla a vytváří se tzv. „key hole“ efekt (český překlad: klíčová dírka). Princip penetračního režimu je znázorněn na obrázku 13.

Tento efekt byl pojmenován na základě svého tvaru. Jedná se o velmi úzký a hluboký otvor tzv. kapiláru, která je naplněna plyny roztaveného kovu a obklopena taveninou. Díky vzájemné rovnováze mezi silovými účinky taveniny a tlakem plynů roztaveného kovu, nedochází k uzavření „key hole“. Na stěnách kapiláry dochází mnohočetné reflexi laserového paprsku, která zvyšuje absorpci.

S pohybem laserového paprsku dochází rovněž k přemístování kapiláry. Ta je obtékána roztaveným kovem, který následně v protisměru svařování tuhne a vytváří úzký svar. Svar se vyznačuje stejnoměrnou strukturou, velkou hloubkou (až 25 mm) a malou tepelně ovlivněnou oblastí.

Tato metoda se využívá především u kovových materiálů, poněvadž u plastů je udržení rovnovážného stavu pro „key hole“ velice obtížné. Skrze velkou hloubku průvaru, lze svařovat i více vrstev naráz.



Obr. 13 Srovnání metod svařování. [38]

1.5 Výhody a nevýhody laserového svařování [14], [15], [38]

Výhody:

- Výborná kvalita svaru
- Vysoká procesní stabilita a rychlost
- Malá tepelně ovlivněná oblast a deformace
- Možnost heterogenního sváření
- Výborná flexibilita a opakovatelnost
- Spolehlivost

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena
- Instrumentačně náročná technologie

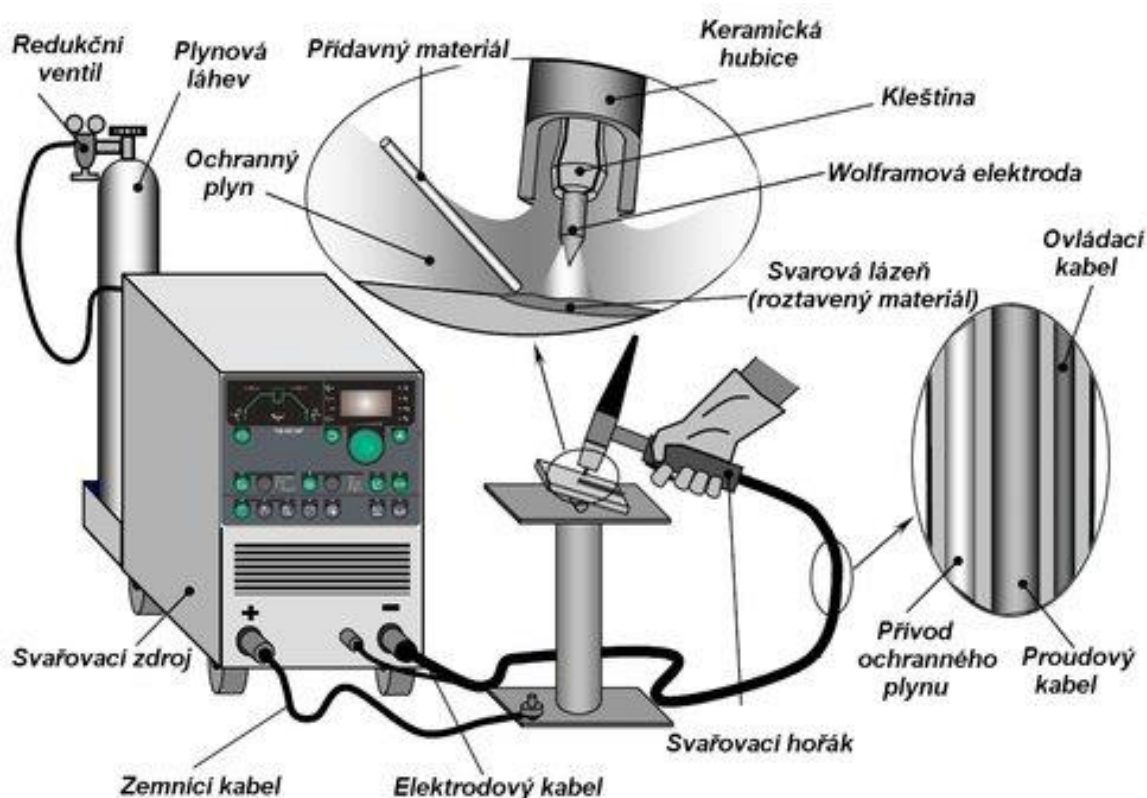
2 TIG SVAŘOVÁNÍ [16], [19], [33], [34], [35], [36], [39], [40], [41], [42]

Zkratka TIG vznikla z anglického Tungsten Inert Gas, což ve volném překladu znamená svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Tato metoda je taktéž označována zkratkou WIG, která pochází z německého Wolfram Inert Gas a byla používána v devadesátých letech minulého století.

Jedná se o technologii obloukového svařování netavící se elektrodou, při které je svarová lázeň chráněna inertním plynem. Princip této metody je založen na přenosu elektrické energie v elektrickém oblouku mezi wolframovou elektrodou a svařencem, při kterém dochází k natavení základního materiálu. Netavící se wolframová elektroda zajišťuje pouze hoření oblouku, a proto je nutné materiál na výsledný svar dodávat buď ručně, nebo mechanicky. Inertní (netečný) plyn, který je foukán do roztaveného oblouku, zajišťuje čistotu svarové lázně.

Technologii TIG svařování může probíhat bez přidání, nebo s přidáním přídavného materiálu. Metodou bez přidání materiálů, dochází ke slití svařovaného materiálu dohromady. V druhé metodě je přidávaný materiál dodáván ve formě drátu nebo tyčinek.

Metodu svařování TIG můžeme aplikovat na široké spektrum materiálu, zejména pro vysoce legované a nástrojové oceli, slitiny na bázi hliníku, mědi, hořčíku, titanu a bronzu.



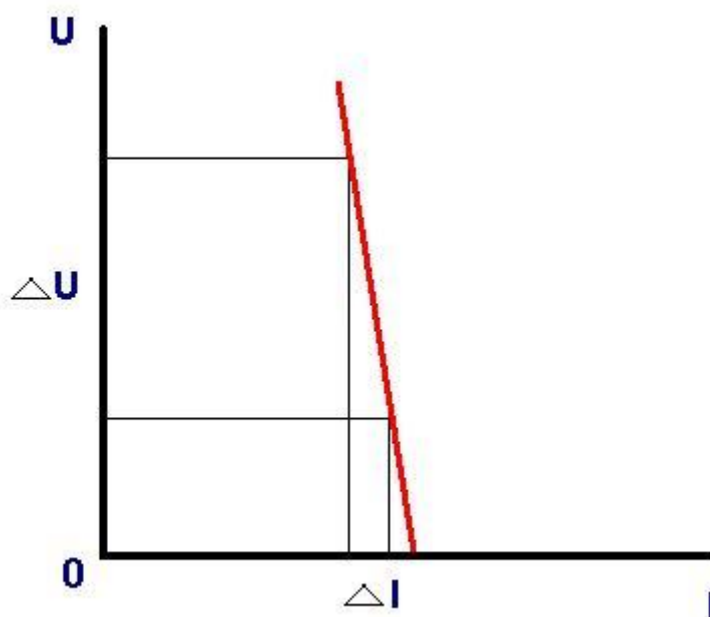
Obr. 14 Princip TIG svařování. [39]

2.1 Svařovací zdroje [41], [42]

Zdroje elektrické energie musí splňovat tři základní požadavky: konstantní výstupní proud, plynulou regulaci proudu a strmou voltampérovou charakteristiku. Tyto požadavky splňují tyristorové zdroje s usměrňovačem a invertorové zdroje, které mohou mít další doplňující prvky pro zajištění dané svařovací metody.

Tyristorové zdroje se vyznačují nízkou účinností, která je zapříčiněna velkou výstupní tlumivkou nezbytnou pro vyhlazení proudu. Pro současné invertorové zdroje tato vlastnost neplatí, naopak jsou vysoce flexibilní na změny během svařovacího procesu. Hlavním rozdílem mezi tyristorovými a invertorovými zdroji je zdrojové napětí. Tyristorové zdroje využívají klasické síťové napětí, oproti tomu invertorové zdroje vyžadují pulsní napětí o vyšších frekvencích. Konstrukce invertorových zdrojů může být mnohem lehčí a kompaktnější jak u tyristorových zdrojů, zejména díky využívání vysokých frekvencí.

Jeden ze tří základních požadavků zmíněných výše, je strmá statická V-A charakteristika. Tato charakteristika je znázorněna na obrázku 15. Je používána také u zdrojů pro ruční svařování obalenou elektrodou. Jak je z grafu patrné, při větších změnách napětí dochází k minimálním změnám proudu.



Obr. 15 Strmá statická V-A charakteristika. [41]

2.2 Svařovací metody [16], [19], [33], [34], [35], [36], [41]






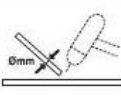



Svařování metodou TIG můžeme rozdělit na tři základní metody dle použitého proudu pro svařovací proces. Tyto metody jsou shodné jako u svařování obalenou elektrodou.

- Svařování stejnosměrným proudem (TIG-DC)
- Svařování střídavým proudem (TIG-AC)
- Svařování impulsním proudem

Označení metod plyne z anglického překladu, který označuje použité svařovací proudy-AC (alternating current) a DC (direct current).

Pro zajištění dobrého svařovacího procesu je nutné dodržovat určité parametry, které jsou znázorněny v tabulce 3.

Tab. 3 Tabulka doporučených svařovacích parametrů pro metodu DC a AC. [34]

							
		(mm)	(A)	(mm)	(mm)	(l/min)	(mm)
TIG DC	Ocel	0.3 - 0.5	5 - 20	0.5	6.5	3	-
		0.5 - 0.8	15 - 30	1	6.5	3	-
		1	30 - 60	1	6.5	3 - 4	1
		1.5	70 - 100	1.6	9.5	3 - 4	1.5
		2	90 - 110	1.6	9.5	4	1.5 - 2.0
		3	120 - 150	2.4	9.5	5	2 - 3
	4	140 - 190	2.4	9.5 - 11	5 - 6	3	
	5	190 - 250	3.2	11 - 12.5	6 - 7	3 - 4	
	Slitiny s Cu	0.3 - 0.8	20 - 30	0.5 - 1	6.5	4	-
		1	80 - 100	1	9.5	6	1.5
1.5		100 - 140	1.6	9.5	8	1.5	
2		130 - 160	1.6	9.5	8	1.5	
TIG AC	Hliník	1	30 - 45	1 - 1.6	6.5	4 - 6	1.2 - 2
		1.5	60 - 85	1.6	9.5	4 - 6	2
		2	70 - 90	1.6	9.5	4 - 6	2
		3	110 - 160	2.4	11	5 - 6	2

2.2.1 Svařování stejnosměrným proudem [35], [41]

TIG DC metodu můžeme ještě rozdělit dle zapojení okruhu na přímou a nepřímou. Pro přímou metodu je wolframová elektroda připojena na záporný pól a svařovaný materiál na kladný pól svařovacího zdroje. U nepřímé metody je zapojení provedeno naopak – elektroda na plus a materiál na mínus. V poslední době je nepřímá metoda používána pouze ojediněle.

- Přímá metoda (TIG DC-)

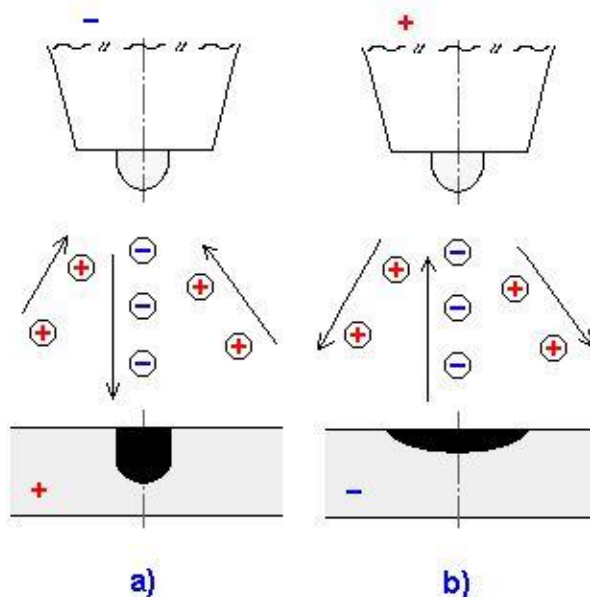
Teoretické zapojení pro přímou metodu bylo zmíněno výše, v praxi je zapojení provedeno takto: TIG hořák je připojený na mínus svorku svářecího zdroje a plus svorka je na zemním kabelu. V průběhu této metody wolframová elektroda vysílá elektrony směrem do svařovaného materiálu. Vzniklé teplo je v poměru: 1/3 na elektrodě a 2/3 na svařovaném materiálu. Tudíž větší množství tepla vzniká ve svařovaném materiálu, to vede k většímu natavení a vznikají úzké a hluboké svary.

Během této metody nedochází k tzv. čistícímu efektu (viz. kapitola 2.2.4) oblouku, tudíž ji nelze použít pro svařování materiálů s odolnou oxidickou vrstvou – hliníkové a hořčíkové slitiny. Proto je používána pro svařování materiálů kde čistící efekt není potřeba, zejména pro široké spektrum ocelí (od nelegovaných konstrukčních až po nerezové). Dále také pro slitiny na bázi mědi, titanu, niklu a při navařování tvrdých vrstev.

- Nepřímá metoda (TIG DC+)

Praktické zapojení této metody je v obráceném provedení jak u přímé metody. Tudíž dochází i k opačnému pohybu elektronů, což vede ke většímu zahřívání netavící se elektrody, která se v krajních případech může odtavit. Proto je nutné zabezpečit intenzivní chlazení elektrody, což vede ke zvýšení pořizovacích i provozních nákladů. Z tohoto důvodu je velmi málo používána v praxi.

Výhodou nepřímé metody je již zmiňovaný čistící efekt (viz. kapitola 2.2.4). Proto je používána pro materiály se silnou oxidickou vrstvou, nicméně pouze pro svařování malých tloušťek, kde se využívají malé proudy.

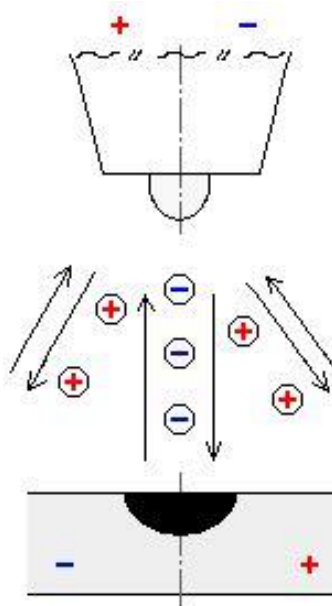


Obr. 16 Princip TIG DC metody a) přímá polarita, b) nepřímá polarita. [41]

2.2.2 Svařování střídavým proudem [16], [19], [41]

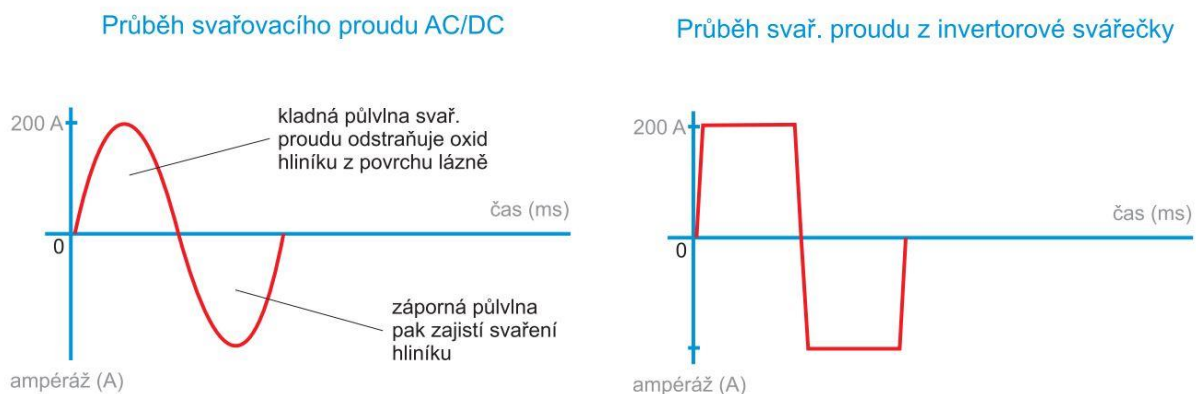
Metoda TIG AC spočívá v periodickém střídání polarity (obr. 17), tzn. půl periody je wolframová elektroda připojena na plus a druhou půlku periody na mínus. To přináší spojení výhod obou výše zmíněných metod (přímá, nepřímá). Během první půl periody (elektroda připojena na plus) dochází k čistícímu efektu, ale také dochází k značnému zahřívání elektrody. V průběhu druhé půl periody (elektroda připojena na mínus) dochází k značnému natavení svařovaného materiálu a k pozvolnému ochlazení elektrody.

Průběhy střídavého proudu se liší dle typu TIG AC svářeček. Zastaralé mají sinusový průběh (obr. 18) s pevným poměrem fází a frekvence (50Hz). Tudíž poměr čištění a svařování je stejný, což vede k nadbytečně velkému čistícímu efektu a k značnému zahřívání elektrody.



Obr. 17 Princip TIG AC metody. [41]

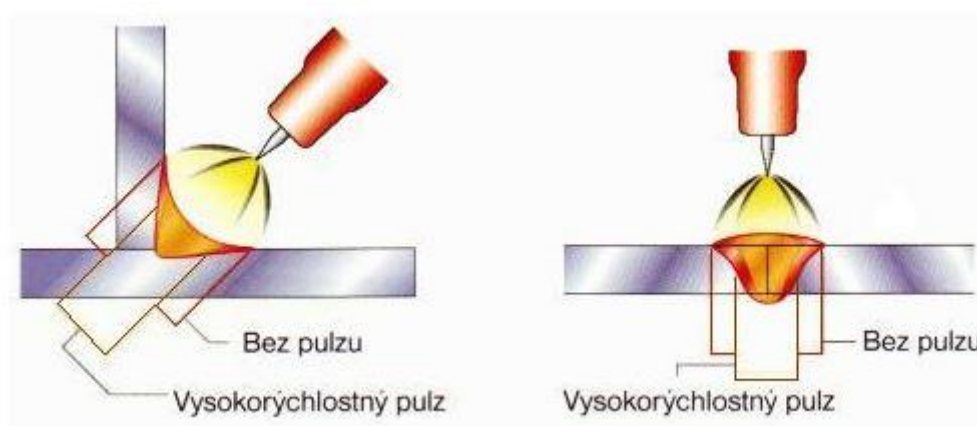
Současné svářecí invertory mají obdélníkový průběh (obr. 18). Umožňují nastavení poměru kladné a záporné fáze, a také i frekvence (20-200 Hz). Většinou je používán poměr 20 až 60% čištění a zbytek svařování. Pro méně zoxidované materiály se používá poměr maximálně 40% čištění.



Obr. 18 Průběhy svařovacího proudu: tyristorové(vlevo), inverterové svářečky(vpravo).[19]

2.2.3 Svařování impulsním proudem [33], [36], [41]

Jedná se o nejnovější metodu TIG svařování, během které dochází k pravidelné změně intenzity proudu mezi dvěma hladinami – základní a impulsní proudová hladina. Dle zdroje může být závislost proudu na čase sinusová, lichoběžníková nebo pravoúhlá (obr. 20).

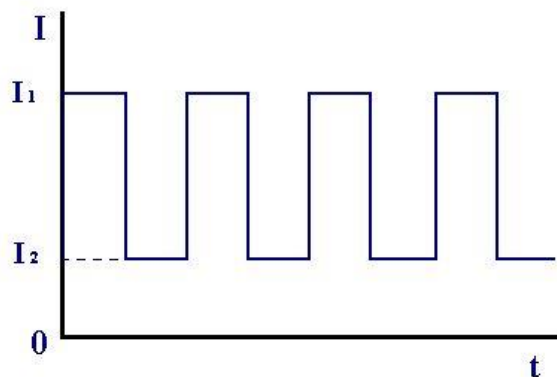


Obr. 19 Rozdíl mezi svary zhotovenými pulsním svařováním a bez pulzu. [41]

Impulsní proud I_1 je nastaven manuálně, zajišťuje natavení svarové lázně a přidavného materiálu. Velikost svarové lázně je regulována amplitudou impulsního proudu a dobou pulsu. To umožňuje velmi dobrou kontrolu nad svařovacím procesem. Hodnoty impulsního proudu bývají z pravidla nižší jak při klasickém svařování.

Základní proud I_2 může být nastaven manuálně anebo automaticky v závislosti na impulsním proudu I_1 . Hodnota základního proudu se pohybuje v rozmezí 20 až 50 % z I_1 . Zajišťuje ionizaci svarové lázně, tzn. prodlužuje dobu hořícího oblouku a tím oddaluje tuhnutí svarové lázně. Nastavením doby působení základního proudu můžeme ovlivnit výsledný vzhled svaru

Impulsním TIG svařováním lze vytvářet penízkový svar (obr. 21) s překrytím 50 až 70 % (estetický svar). Během svařování dochází k tvorbě malé tepelně ovlivněné oblasti a minimálnímu mísení svařovaného materiálu.



Obr. 20 Průběh pulsního proudu. [41]



Obr. 21 Ukázka penízkového svaru. [33]

2.2.4 Čistící efekt [35], [41]

Hlavní výhodou a také důvodem používání metody TIG pro svařování hliníku, titanu nebo hořčíku je tzv. čistící efekt. Tyto kovy a jejich slitiny snadno oxidují a tvoří na povrchu tenkou oxidickou vrstvu, která brání metalurgickému spojení. Zásadním důvodem je velmi rozdílná teplota tavení oxidu a kovů, např. Al_2O_3 se taví při $2050\text{ }^\circ\text{C}$ a Al při $580\text{--}660\text{ }^\circ\text{C}$. Navíc oxid hliníku má větší hmotnost než hliník a nelze dosáhnout rozpustnosti v tavenině ani v tuhém roztoku. Oxidové vměstky významně zhoršují mechanické vlastnosti a výslednou kvalitu svaru, proto je nezbytné odstranění.

To můžeme provést několika způsoby: mechanicky, chemicky nebo elektrickým obloukem s argonem. Mechanické čištění se provádí obroušením nebo kartáčováním, není velmi účinné a musí se provádět neprodleně před svařováním. K chemickému čištění se využívají speciální pasty a rozpouštědla k tomu určené. Výše zmíněné metody se používají u ostatních metod svařování, zejména při svařování plamenem. Nejlepší výsledky jsou dosaženy během čistícího efektu elektrického oblouku s využitím argonu při metodě TIG.

Čistící efekt elektrického oblouku vzniká pouze při nepřímém zapojení (viz. 2.2.1). Kladné ionty vystřelují z netavící se elektrody a dopadají na základní materiál (katodu), kde svojí dopadovou kinetickou energií narušují oxidační vrstvu. Čištění je zároveň podporováno tzv. katodovou skvrnou, která mění svoji polohu. Vyhledává místa s nejmenší emisí (vyzařující) energií, kde je zároveň nejvyšší koncentrace oxidů a následně je svojí energií odpařuje.

2.3 Výhody a nevýhody TIG svařování [39], [40]

Výhody:

- Výborná kontrola a účinná ochrana nad svarovou lázní
- Malá TOO
- Možnost svařování s přídavným i bez přídavného materiálu

Nevýhody:

- Nízká produktivita
- Technická náročnost zařízení (vysoká pořizovací cena)

3 HYBRIDNÍ SVAŘOVÁNÍ LASER-TIG [6], [7], [17]

Koncept hybridního laserového obloukového svařování byl navržen už na konci sedmdesátých let minulého století. Ten však v té době neměl využití, jelikož proces laserového svařování nebyl dostatečně prozkoumán a byl velice drahý. Zvýšený zájem zaznamenal až v posledním desetiletí.

Hybridní Laser-TIG svařování lze označit jako kombinované svařování laserovým svazkem a procesy svařování obloukem TIG. Spojením těchto dvou metod svařování dochází ke kompenzaci nevýhod, které jsou pro tyto metody svařování typické. Existují různé varianty hybridních svařování, které závisí na použitém laserovém zdroji a oblouku. Během procesu laserového hybridního svařování je laserový svazek zpravidla používán jako primární zdroj tepla, zejména díky vysoké energetické hustotě, a zajišťuje hluboký průvar. Zatímco oblouk, který působí jako sekundární zdroj tepla, obstarává doplňkové funkce za účelem zlepšení stability, efektivity a spolehlivosti svařovacího procesu.

3.1 Základní konfigurace Laser-TIG [17]

Používají se dvě základní uspořádání soustavy, první z nich, kde laserový paprsek předchází elektrický oblouk a druhá, kde je konfigurace provedena opačně. Tyto dvě základní uspořádání jsou vyobrazeny na obr. 22.



. Obr. 22 Uspořádání soustavy Laser-TIG. [17]

První uspořádání (laserový paprsek před hořákem) je zejména používáno pro svařování hliníku a jeho slitin, jelikož dochází k odstranění oxidové vrstvy před obloukovým svařováním. Hlavní předností tohoto uspořádání je tvorba tzv. estetického svaru.

V druhém případě uspořádání (hořák před laserovým paprskem) je svařovaný materiál nahříván hořákem a laserový paprsek působí už na zahřátou svarovou lázeň. Se zvyšující se teplotou svarové lázně dochází k větší absorpci, tudíž i k menším ztrátám tepelné energie. Větší absorpce laserového paprsku má za následek vznik hlubokého průvaru.

3.2 Parametry Laser-TIG [6], [7], [17]

Počet procesních parametrů je významně vyšší, oproti ostatním svařovacím metodám, jelikož jsou do nich zahrnuty parametry obou metod. Konkrétně do procesních parametrů laserového paprsku řadíme: polohu ohniska vzhledem k povrchu materiálu a výkon. Pro metodu TIG to je průměr elektrody, kvalita a objemové množství ochranného plynu, úhel nastavení, a především velikost proudu.

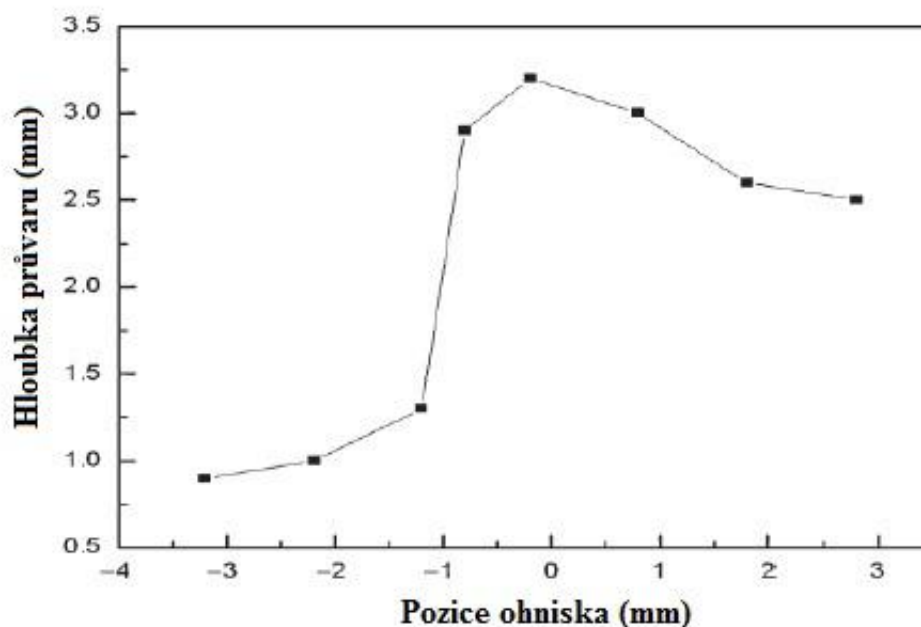
Jedinými společným procesním parametry je svařovací rychlost a vzdálenost mezi laserovým svazkem a netavící se elektrodou.

Vysoký počet procesních parametrů má své výhody i nevýhody, proto je nutné dbát zvýšené pozornosti při nastavení těchto parametrů. Značnou nevýhodou je složité nastavení svařovacího procesu, aby bylo dosaženo kvalitního svaru. Nicméně velké množství procesních parametrů rozšiřuje oblast použití této svařovací metody. Mohou být vytvářeny více typů svarů na různých tloušťkách materiálu, a to na jednom svařovacím agregátu.

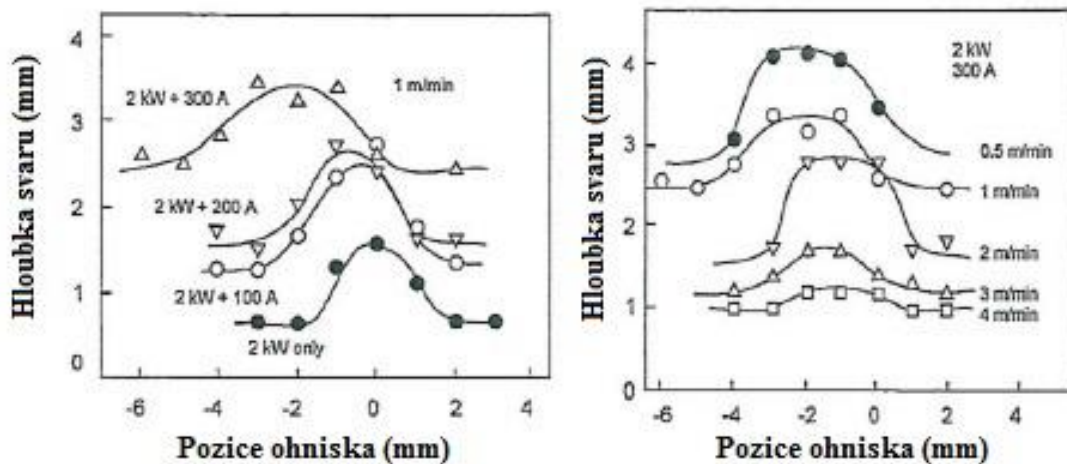
- Zaostřování laserového svazku

Je charakterizováno polohou ohniska laserového paprsku vzhledem k povrchu svařovaného materiálu. Tato poloha ovlivňuje hustotu výkonu laserového paprsku, tok svarové lázně a hloubku průvaru. Pozice ohniska při hybridním svařování laser-TIG se nepatrně liší v porovnání s použitím samotného laseru. Z důvodu konkávního povrchu svařované lázně, který vznikl dynamickým obloukovým tlakem, se pozice ohniska posune hlouběji do svařovaného materiálu. Vliv posunu ohniska na hloubce průvaru je znázorněn na obrázku 23. Největší hloubka průvaru je dosahováno při pozici ohniska mezi -0,8mm (pod povrchem) až 0,8mm.

Velikost a konkávnost povrchu svarové lázně jsou ovlivněny svařovacím proudem a rychlostí, tudíž ovlivňují i polohu ohniska. Při vyšších rychlostech svařování se posouvá poloha ohniska pod povrch svařovaného materiálu. Tyto závislosti jsou vyobrazeny na obrázku 24.



Obr. 23 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru. [17]

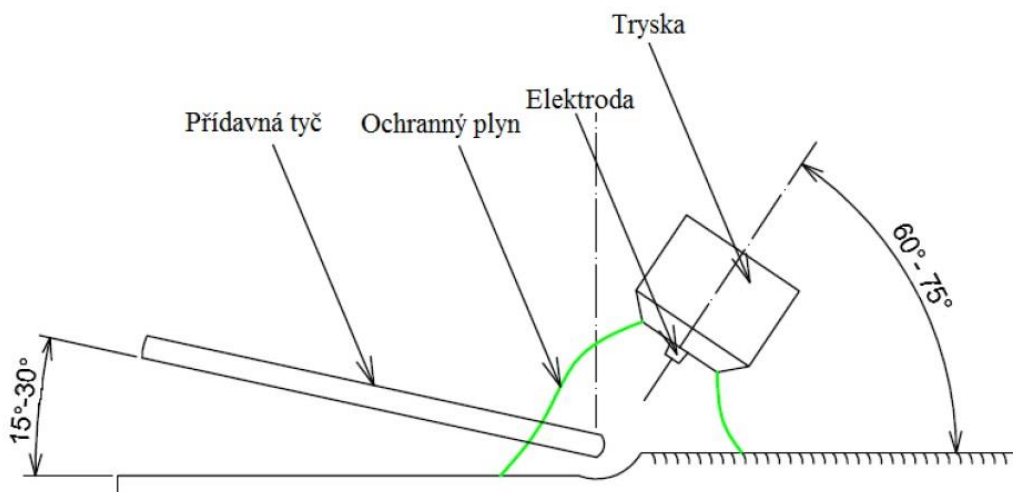


Obr. 24 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru s konstantním a) proudem b) rychlostí. [17]

- Úhel nastavení hořáku

U svařování metodou TIG musí být dodržen správný úhel hořáku a přídavného materiálu vůči základnímu materiálu. Správné nastavení úhlů má vliv na výsledný svar, zejména po jeho estetické stránce. Během ručního svařování tyto úhly zajišťuje svářeč, a jsou znázorněny na obrázku 25.

Avšak hybridní svařování laser-TIG probíhá bez přídavného materiálu, tudíž dochází k nastavení jen jednoho úhlu, a to mezi hořákem a osou laserového svazku. Hodnota tohoto úhlu se pohybuje v rozmezí 30° až 45° .



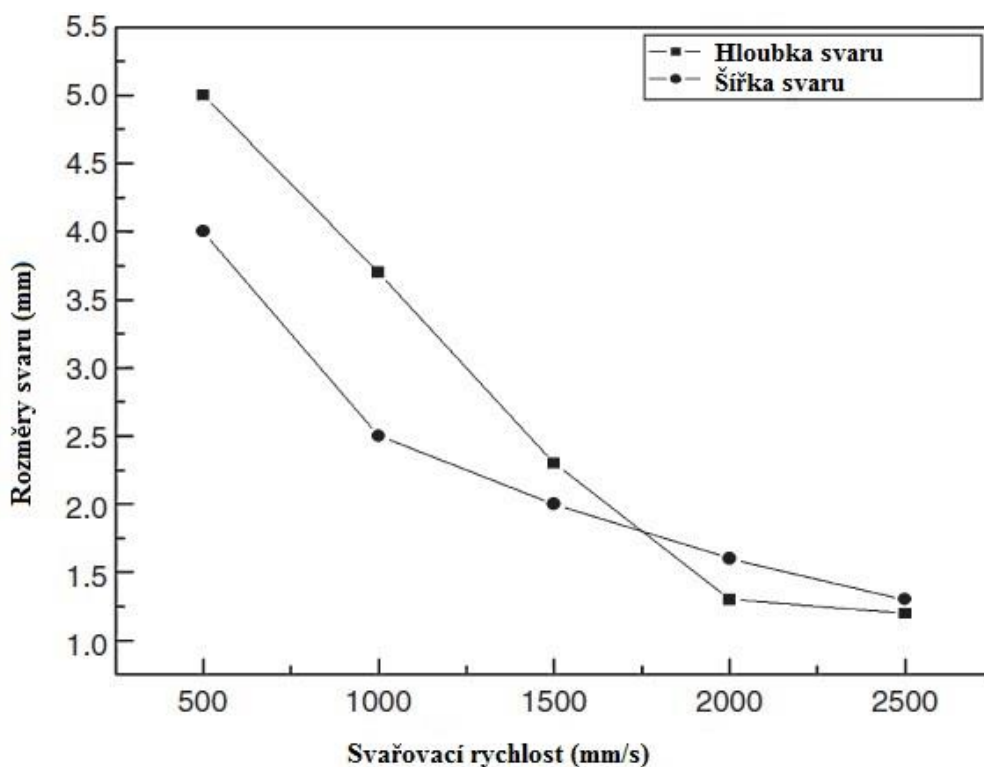
Obr. 25 Schématické znázornění pracovních úhlu během metody TIG. [17]

- Svařovací rychlost

Jeden z nejdůležitějších parametrů svařovacího procesu, který ovlivňuje výslednou ekonomiku procesu. Proto se většinou v praxi snaží zachovat konstantní svařovací rychlost a upravují se výkonové parametry.

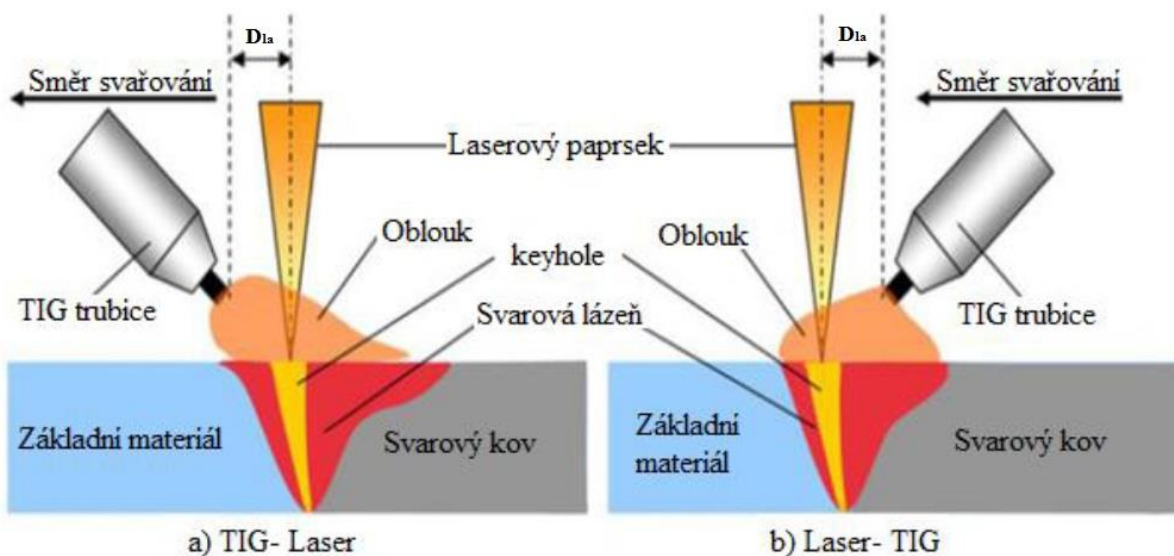
Velikost svařovací rychlosti ovlivňuje výsledné rozměry svaru – hloubku a šířku.

S rostoucí rychlostí se tyto rozměry zmenšují, to je důsledkem zmenšujícího tepelného příkonu. Závislost svařovací rychlosti na rozměrech svaru je vyobrazena na obrázku 26.



Obr. 26 Závislost svařovací rychlosti na rozměrech svaru. [17]

- Vzdálenost mezi laserovým svazkem a netavící se elektrodou
Tato vzdálenost (obr. 27), dále značena D_{LA} , může být klasifikována jako jeden z důležitějších parametrů, který má vliv na interakci laserového paprsku a svařovacího oblouku.



Obr. 27 Vzdálenost mezi laserovým svazkem a netavící se elektrodou. [17]

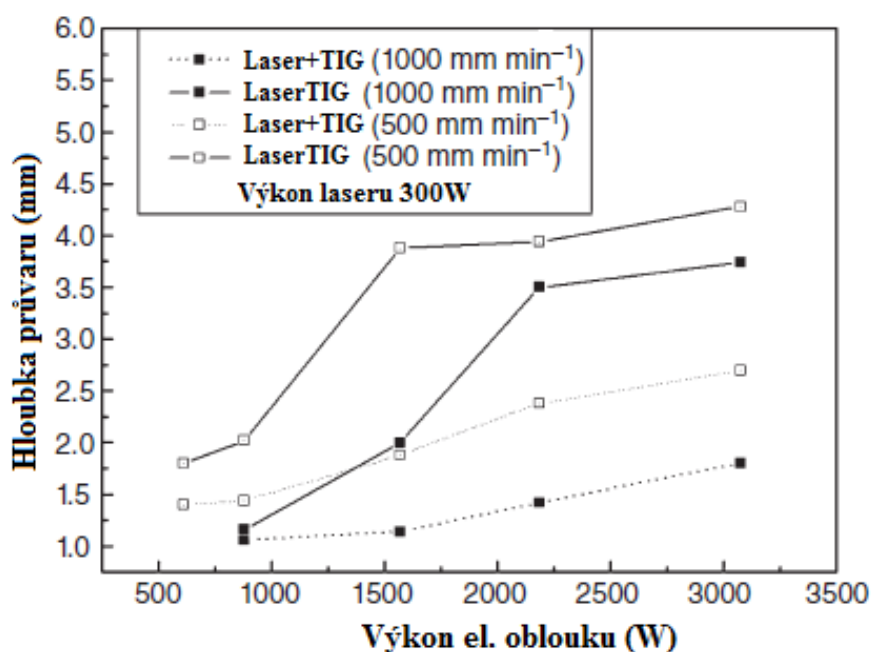
Dále také ovlivňuje hloubku průvaru, poklesem hodnoty D_{LA} se zvětšuje hloubka průvaru. Nicméně pokud je hodnota D_{LA} příliš malá, dochází k odtavení elektrody laserovým paprskem, následnému snížení stability oblouku a možnosti vzniku svarových vad.

Doposud byli provedeny experimenty na zkoumání D_{LA} pouze u hořčkových slitin, nikoliv u hliníkových slitin. Proto lze jen odhadovat optimální hodnotu D_{LA} pro hliníkové slitiny. Budeme-li vycházet z experimentů prováděných u hořčkových slitin, tak optimální hodnota D_{LA} se nachází v intervalu od 1 mm do 6 mm.

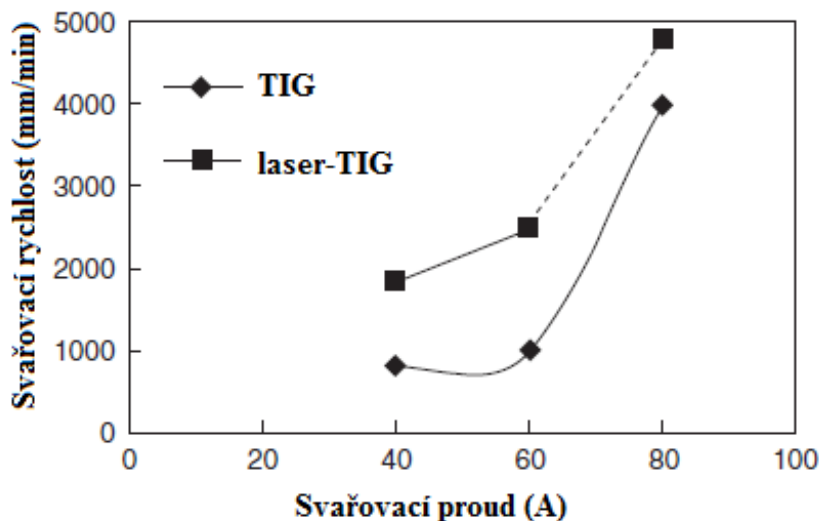
- Výkon a proud el.oblouku

Jedny z nejdůležitějších procesních parametrů hybridního svařování Laser-TIG, které ovlivňují výslednou kvalitu svaru a zejména hloubku průvaru. Hodnota hloubky průvaru je mnohonásobně vyšší (cca dvojnásobně) než celkový součet hloubek průvaru obou metod provedených zvlášť. Na obrázku 28 je znázorněna závislost hloubky průvaru na výkonu el. oblouku, která nám výše uvedené tvrzení potvrzuje.

Obrázek 29 ukazuje stabilitu svařovacího procesu při metodách TIG a hybridní Laser-TIG při různých svařovacích rychlostech a proudech. Svařovací proces je zřetelně stabilnější při nízkých proudech. Jelikož plazma generována laserovým paprskem má vyšší elektronovou hustotu, která snižuje odolnost oblouku a termionické emise jsou velmi snadno proveditelné.



Obr. 28 Závislost výkonu el. oblouku na hloubce průvaru. [7]



Obr. 29 Stabilita Laser-TIG a TIG svařování jako funkce rychlosti a proudu. [7]

3.3 Výhody a nevýhody Laser-TIG [7], [17]

Mezi hlavní výhody této metody svařování na hliníkových slitinách je dosažení vysoké stability procesu (snížení pórovitosti) při vysokých svařovacích rychlostech.

Během samotného laserového svařování dochází k tvorbě velmi hlubokého a úzkého svaru. Dochází k rychlému tuhnutí svaru a vysoké pravděpodobnosti nerozpustnosti vodíku, který je rozpustný pouze v tavenině a uniká pouze při pomalých procesech chladnutí. Nerozpuštění vodík v tuhém roztoku snižuje statické i dynamické vlastnosti a takový svar je pro praktické účely nepoužitelný. Tomuto procesu předejdeme použitím elektrického oblouku metody TIG, který zvětší šířku svaru, a tudíž i prodlouží proces tuhnutí svarové lázně. Páry vodíku mají dostatek času na uniknutí ze svarové lázně a rapidně se sníží pórovitost svaru.

Výhody:

- Vysoká svařovací rychlost a stabilita procesu
- Proudová hustota laser-TIGu je vyšší než u samotné metody TIG – to má za důsledek malou tepelně ovlivněnou oblast
- Účinnost laser-TIGu je výrazně vyšší jak u obou metod zvlášť
- Odstranění oxidové vrstvy při svařování hliníkových slitin
- Všestranné využití – díky velkému množství procesních parametrů
- Možnost svařování bez i s přídavným materiálem

Nevýhody:

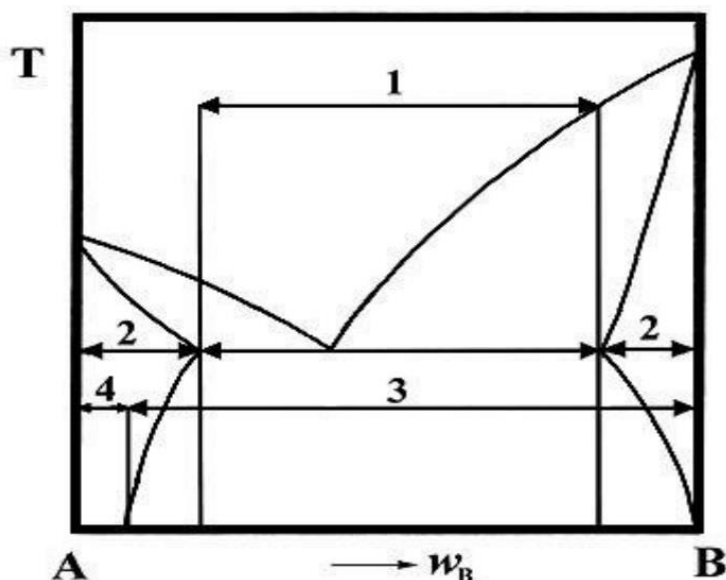
- Vysoká pořizovací cena
- Komplikované nastavení optimálního svařovacího procesu

4 HLINÍKOVÉ SLITINY [4], [18], [22], [43]

Hliník patří po železe mezi nejpoužívanější kovy, a to především díky jeho měrné hmotnosti, dobré vodivosti a schopnosti pasivace povrchu vrstvou oxidu hlinitého, která brání korozi. Hliník je stříbrolesklý kov s teplotou tání 660°C . Vyskytuje se v kubické plošně centrované mřížce, což má vliv na jeho dobré plastické vlastnosti za tepla i za studena. Na rozdíl od jeho dobré svařitelnosti v ochranných atmosférách má i svoje nevýhody, a to jeho tvrdost a špatná obrobitelnost. Nejběžnější horninou hliníku je bauxit, ze kterého lze redukcí pomocí Bayerova procesu získat tento kov.

4.1 Vlastnosti hliníkových slitin [4], [22]

Legováním – změnou chemického složení hliníkových slitin lze měnit mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti. Z tohoto pohledu, je znalost fyzikální metalurgie slitin hliníku prerekvizitou pro jeho účelné legování. Velice důležité pro hliníkové slitiny je také především precipitační zpevnění – vytvrzování, s čím souvisí tepelné zpracování.



Obr. 30 Rozdělení slitin hliníku dle rozpustnosti v tuhém stavu. [22]

Jak lze vidět na obrázku 30, hliníkové slitiny lze dělit dle rozpustnosti v tuhém stavu podle binárního diagramu. Základní rozdělení je na:

- Slévárenské slitiny
- Slitiny určené ke tváření
- Precipitačně vytvrditelné
- Precipitačně nevytvrditelné

Ve slévárenských slitinách se vyskytuje eutektikum, což snižuje teplotu tavení a tudíž jsou z ekonomického hlediska vhodné k odlévání. Naopak ve slitinách tvářitelných se eutektikum nevyskytuje. Slitiny podléhající změně rozpustnosti v tuhém stavu, lze po solidifikaci tepelně zpracovávat – precipitačně vytvrzovat. Slitiny nepodléhající změně rozpustnosti v tuhém stavu nelze dále tepelně upravovat.

Slitiny hliníku jsou především legovány těmito prvky: Mg, Si, Mn, Cu, Zn, Sn. Značení hliníkových slitin pro tváření popisuje norma ČSN EN 573-1, což je zařazeno do následujících skupin:

Tab. 4 Značení slitin hliníku ke tváření. [4]

Skupina	Legující prvek
1000	Al minimálně 99.00%
2000	Měď
3000	Mangan
4000	Křemík
5000	Hořčík
6000	Hořčík a křemík
7000	Zinek
8000	Jiné prvky

Za zmínku stojí fakt, že u tvářitelných slitin hliníku lze rozsáhle měnit škálu mechanických, fyzikálních a technologických vlastností přesným obsahem legujících prvků, tepelným zpracováním a parametry tváření.

4.2 Svařitelnost hliníkových slitin [4], [18], [43]

Svarové spojení dílů má nepochybně značný vliv na mechanické a únavové vlastnosti spojených dílů jako celku. Změna struktury a chemických vlastností svarového spoje hraje důležitou roli. Kvalitu svarového spoje ovlivňuje použitá metoda svařování, tak i typ svařovaného materiálu. Při svařování hliníkových slitin je nutno rozlišit, zda se jedná o vytvrditelné či nevytvrditelné. V průběhu svařování dochází v okolí svaru vlivem vzniklého tepla k teplotnímu ovlivnění oblasti svaru – tzv. tepelně ovlivněná zóna (TOO). Nutno podotknout, že vytvrditelné slitiny se musí svařovat v nevytvrzeném stavu, aby bylo zajištěno homogenních vlastností po vytvrzení.

Obecně lze říci, že hliníkové slitiny jsou dobře svařitelné. Hliníkové slitiny je možno svařovat širokou škálou metod: elektrickým obloukem, elektronovým paprskem, laserem, plamenem, plazmou. Největší problém představuje vznik nevodivé vrstvy Al_2O_3 . Jak již bylo zmíněno (viz. kapitola 2.2.4), existuje ovšem řada metod, jak odstranit vrstvu Al_2O_3 . Vysoká tepelná vodivost hliníku tvoří další problém, jelikož je nutné použít zdroj s vyšším tepelným příkonem, což značně ovlivňuje TOO. V některých případech je také nutné použití předehřevu.

4.2.1 Svarové vady a defekty [18], [43]

Vady lze detekovat mnohdy na první pohled, nebo přes jednoduché metody až poměrně sofistikovanými přístupy jako je například detekce ultrazvukem. Norma ČSN dělí vady na: přípustné, nepřípustné, opravitelné, neopravitelné.

Přípustné normy není zapotřebí opravovat, jelikož vyhovují normě. Intuitivně nepřipustné vady normě nevyhovují a součást, na které byly nalezeny, nesmí být použita. Opravitelné a neopravitelné typy vad poté specifikují, zda je možné s vadou dále pracovat či nikoliv. Samozřejmě, do procesu lze zařadit pouze zařízení a součásti, které normu splňují a neměly by ovlivnit funkci a bezpečnost provozu.

Defekty ve svarech lze také rozdělit do dvou hlavních skupin, a to podle tvaru a podle polohy výskytu. Rozdělení typů vad je znázorněno na obrázku 31.



Obr. 31 Typy vad ve svarech. [43]

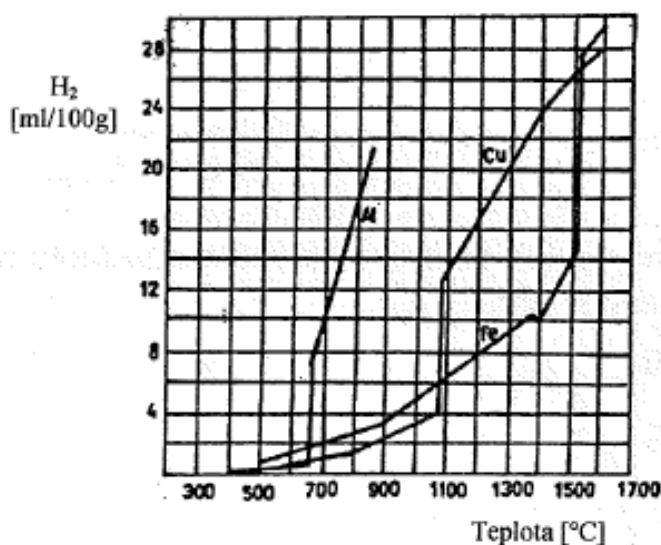
Tvarové vady jsou: bodové, plošné a prostorové. Typické příklady bodového defektu jsou například mikropóry nebo malé kulovité vměstky. Plošné vady představují trhliny, studené spoje anebo neprůvazy. Do prostorových vad patří póry nebo bubliny (tzv. plynové dutinky), dále pak vměstky (tavidlo, oxidy, kovy a struska) a staženiny. Podle polohy výskytu lze vady rozdělit na povrchové a vnitřní.

Během svařování hliníkových slitin jsou nejčastějšími problémy: pórovitost svaru, horké trhliny (ojediněle i studené) a oxidická vrstva na povrchu.

- Pórovitost svaru

Obecně tato nejčastější svarová vada hliníkových slitin je zapříčiněná vodíkem. Jak už bylo zmíněno (kapitola 3.5), vodík je rozpustný pouze v tavenině. Tzn. pórovitost vzniká díky výrazné změně rozpustnosti hliníku, která je závislá na teplotě. Tato závislost je vyobrazena na obrázku 32.

Z grafu je patrné, že hodnota rozpustnosti vodíku se zmenšuje s klesající teplotou hliníku. Hliníkové slitiny rychle tuhnou, tzn. že vodík se rozpustí pouze částečně a zbytky zůstávají ve svaru. K vyloučení zbytků dochází až pod teplotou solidu, což zapříčiňuje vznik pórů a bublin.



Obr. 32 Rozpustnost vodíku v hliníku. [18]

U laserového svařování je pórovitost zapříčiněna dynamikou keyhole a kmitáním svarové lázně. Když se spodní část keyhole zaškrtní, vzniká bublina, která svarovou lázni stoupá nahoru. Předpokládám, že prodloužení doby tuhnutí svarové lázně vede ke snížení pórovitosti, tzn. bubliny mají delší čas na únik ze svarové lázně.

Existují několik základních způsobů, jak docílit snížení pórovitosti: odstranění nebo alespoň snížení zdroje vodíku před svařováním; zamezení přehřátí a snížení doby tavení; uplatnění patřičné ochrany svarové lázně.

- Horké trhliny

Mohou se vyskytovat ve svarovém kovu a rovněž i v tepelně ovlivněné oblasti. Zásadní vliv na tvorbu horkých trhlin má způsob krystalizace, segregace, technologie svařování, parametry, předehřev a zejména typ a množství eutektické fáze. Svary, u kterých dochází k velké prodlevě během tuhnutí jsou náchylnější na vznik horkých trhlin.

Horké trhliny vznikají za předpokladu, že objem eutektika je příliš malý a dochází k neúplnému zaplnění prostoru mezi rostoucími dendrity. Nejvíce náchylné slitiny hliníku na tento typ trhliny jsou: tepelně zpracovatelné (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg); nízkolegované (Al-Mg, zejména AlMg₂, AlMg₃) a některé typy technického hliníku. Ke každé z výše uvedených skupin je určena kritická hodnota legujícího prvku, při které je nejvyšší pravděpodobnost vzniku horkých trhlin.

Tendenci vzniku horkých trhlin můžeme minimalizovat několika způsoby: použitím předehřevu; vhodná volba přídavného materiálu a technologie (s vysokou svařovací rychlostí); během svařování se vyvarovat tuhému upnutí svarových spojů.

5 EXPERIMENT

Cílem experimentu je optimalizace procesních parametrů metody hybridního svařování laser-TIG, které minimalizují vznik pórovitosti ve svaru. Experiment spočíval ve vyhotovení zkušebních svarů se změnou proudu a polarity. Ostatní procesní parametry zůstávali konstantní. Zkušební svary byly vyhotoveny na plechu slitiny hliníku EN AW-5754 H111 tl.5 mm, a to ve dvou sériích. Posléze byly vyhotoveny metalografické výbrusy, na kterých byla měřena hloubka, šířka a plocha svaru. Následně byla provedena analýza svarových vad a vizuální zhodnocení svarů.

5.1 Svařování vzorků

Použité přístroje:

Vysoce výkonný vláknový laser YLS-2000, IPG

Robotické rameno ABB - IRB 2400/16

Svařovací inventar MagicWave 1700 Job G/F, Fronius

Svařovací parametry:

Výkon: $P=1800$ W

Svařovací rychlost: $v=20$ mm/s

Elektroda: červená $\varnothing D=2,5$ mm

Ochranný plyn: Argon 4,6 (čistota 99,996%)

Tlak ochranného plynu: $P_{Ar}=0,2$ bar

Odstup trysky: $L_t=21$ mm

Odstup elektrody: $L_e=3$ mm

Odklon laseru od normály (přibližně): $\gamma_1=3^\circ$

Odklon TIGu od normály (přibližně): $\gamma_2=36^\circ$

Proměnné svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Zkušební materiál:

Plech z Al slitiny EN AW-5754 H111 tl.5 mm.

Slitiny hliníku a magnézia nelze tepelně vytvrdit, zvýšení pevnosti můžeme docílit tvářením za studena. Tato slitina hliníku je označována jako dobře svařitelná běžnými svařovacími metodami používanými pro hliník. Vyznačuje se dobrou odolností proti atmosférické korozi, zejména v mořských prostředích.

Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v materiálovém listu, který je v příloze (příloha č.1)

Tab. 5 Svařovací parametry.

číslo vzorku	Proud [A]	Polarita elektrody
1	0	-
2	10	minus
3	20	minus
4	30	minus
5	40	minus
6	10	plus
7	20	plus
8	30	plus
9	40	plus
10	50 (100Hz)	střídavá
11	50 (500Hz)	střídavá

Postup:

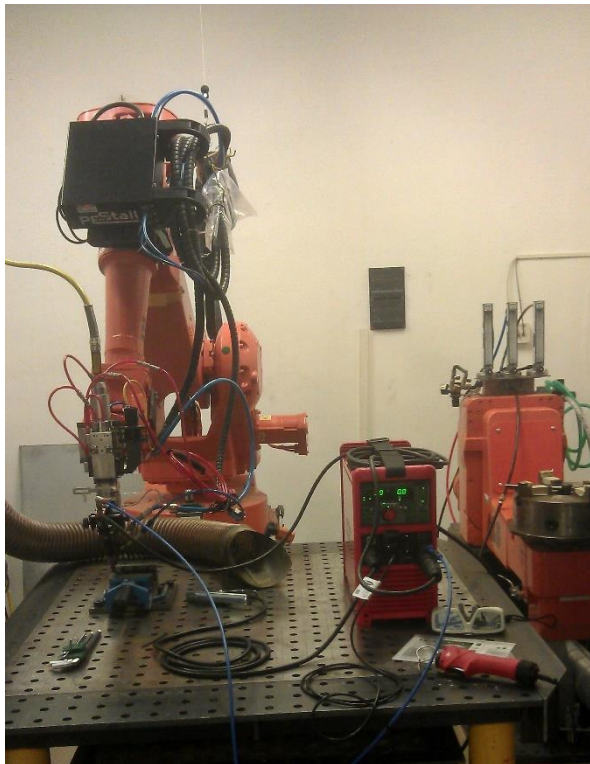
Byly realizovány dvě série vzorků na dvou plechách z Al slitiny o rozměrech 300x80x5 mm. V první sérii bylo vyhotoveno 11 zkušebních svarů a v druhé pouze 9 zkušebních svarů v délce 65 mm. Procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 5. První svar z obou sérii byl vyhotoven pouze laserem a další hybridním svařováním laser-TIG, kde se měnila polarita a velikost svařovaného proudu. Na poslední dva svary z první série byl použitý střídavý svařovací proud.

Svařovací sestava, na které experiment probíhal, i detailní pohled na svařovací hlavu, jsou znázorněny na obrázcích 34 a 35. Popis svařovací sestavy se nachází v příloze č.2.

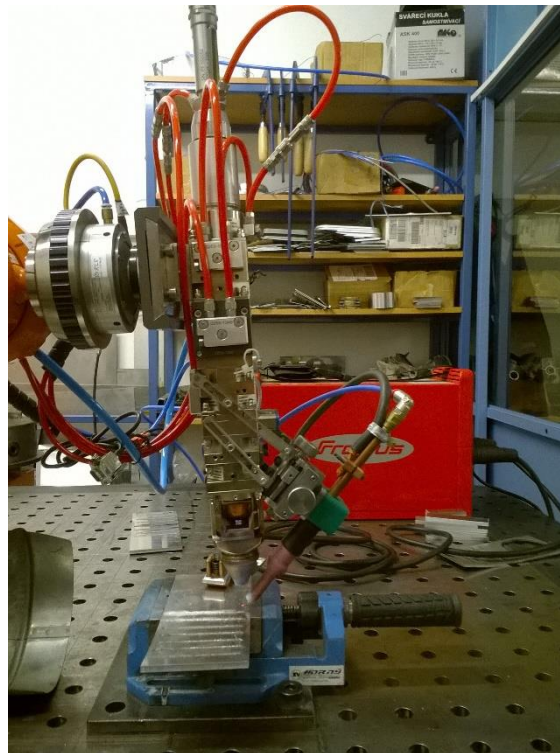
Po dokončení svařovacího procesu byly zkušební vzorky popsány čísly a parametry svařovacího procesu obr 33.



Obr. 33 Zkušební svary.



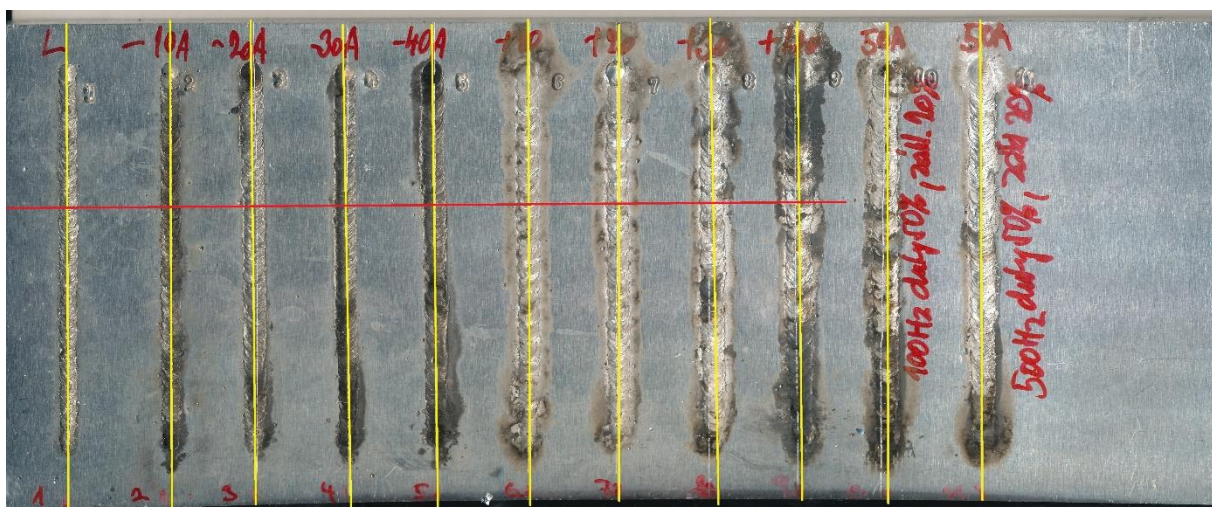
Obr. 34 Svařovací sestava Laser-TIG.



Obr. 35 Detail svařovací hlavy.

5.2 Metalografické výbrusy

Po svaření zkušebních svarů následovalo vyhotovení metalografických výbrusů. V první fázi procesu došlo k rozříznutí vzorků na pásové pile na kov. První série vzorků byla řezána v podélném směru v ose svaru a ve druhé sérii byli vzorky řezány v kolmém směru na osu svaru. Schémata řezání jsou vyobrazena na jednom obrázku 36, žlutá barva pro první sérii vzorků a červená pro druhou.



Obr. 36 Schéma řezání vzorků pro první (žlutá) a druhou (červená) sérii.

Následně byly vzorky broušeny brusnými papíry o hrubosti 120, 240 a 500. Tato hrubost je dostačující, jelikož bylo provedeno pouze makroskopické vyhodnocení vzorků (pro mikroskopické vyhodnocení bychom museli zvolit jemnější). Poté pro vyvolání mikrostruktury svaru byly vzorky leptány. Bylo použito leptadlo Keller – 2ml HF, 6ml HCl, 10ml HNO₃, 60ml H₂O, po dobu 3 minut. Následoval oplach vodou, který vypláchl zbytky leptadla ze vzorku a zamezil tím další naleptání. Na závěr byly opláchnuty lihem (zamezení tvorby mapy) a vysušeny průmyslovým fénem na 180 °C.

Potom byly vzorky snímány, pro každou sérii bylo nasnímání odlišné. Pro první sérii byly vzorky oskenovány. U druhé série snímání probíhalo za pomoci mikroskopu Olympus SZ61.

Výsledné měření rozměrů svaru bylo provedeno pouze u druhé série vzorků, první série byla použita pro analýzu svarových vad. Měření šířky a hloubky svaru probíhalo v grafickém programu Olympus Stream Basic. Pro změření plochy svaru byl použit program Adobe Acrobat Pro DC.

5.3 Závislost rozměrů svarů na svařovacím proudu TIG

V této experimentální části byla zkoumána závislost rozměrů svaru (šířka, hloubka) na velikostech a polaritě svařovacího proudu TIG. Závislosti byli rozděleny do dvou skupin, první pro zápornou polaritu a druhá pro kladnou polaritu.

Závislost č.1 (záporná polarita):

Svařovací parametry:

Výkon laseru: P=1800 W

Svařovací rychlost: v=20 mm/s

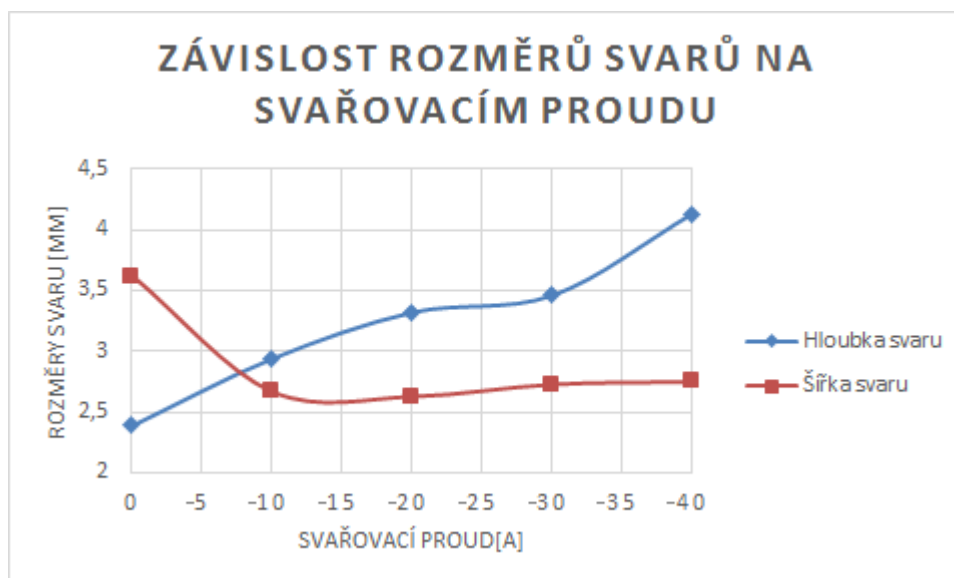
Svařovací proud = 0; -10; -20; -30; -40 [A]

Ostatní svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

Naměřené hodnoty rozměrů byly přepsány do tabulky 6 a zaneseny do grafu (obr. 37).

Tab. 6 Naměřené hodnoty rozměrů (záporná polarita).

	Svařovací parametry				
	Laser	Laser-TIG -10A	Laser-TIG -20A	Laser-TIG -30A	Laser-TIG -40A
Číslo vzorku	1	2	3	4	5
Hloubka svaru [mm]	2,39	2,94	3,32	3,46	4,13
Šířka svaru [mm]	3,62	2,67	2,63	2,73	2,75



Obr. 37 Graf závislosti č.1 (záporná polarita).

Závislost č.2 (kladná polarita):

Svařovací parametry:

Výkon laseru: $P=1800\text{ W}$

Svařovací rychlost: $v=20\text{ mm/s}$

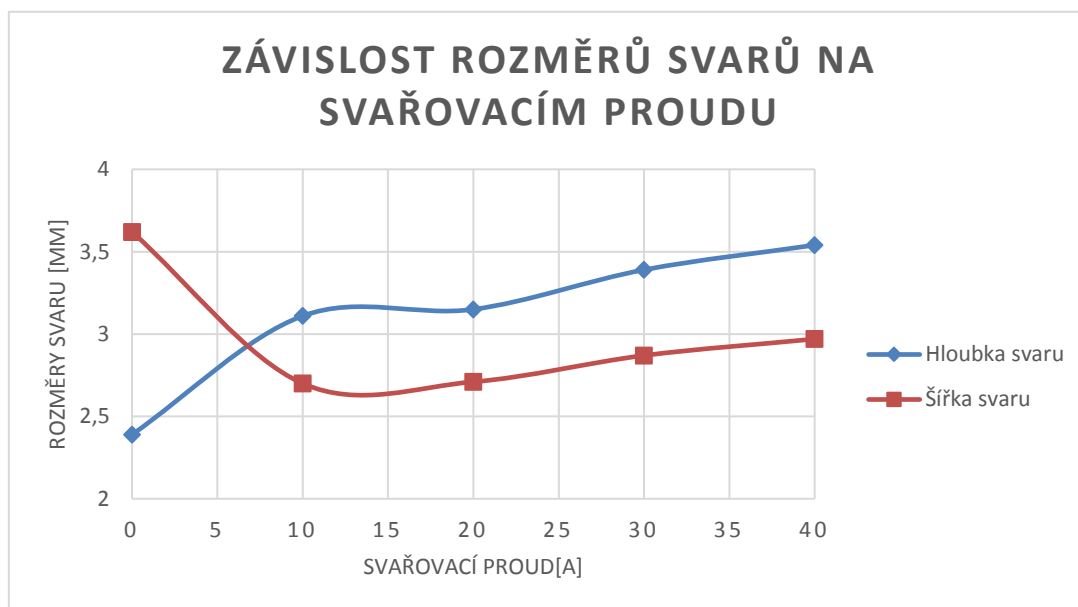
Svařovací proud = 0; +10; +20; +30; +40 [A]

Ostatní svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

Naměřené hodnoty rozměrů byly přepsány do tabulky 7 a zaneseny do grafu (obr. 38).

Tab. 7 Naměřené hodnoty rozměrů (kladná polarita).

	Svařovací parametry				
	Laser	Laser-TIG +10A	Laser-TIG +20A	Laser-TIG +30A	Laser-TIG +40A
Číslo vzorku	1	6	7	8	9
Hloubka svaru [mm]	2,39	3,11	3,15	3,39	3,54
Šířka svaru [mm]	3,62	2,7	2,71	2,87	2,97



Obr. 38 Graf závislosti č.2 (kladná polarita).

Závislost č.2 (kladná polarita) má stejný charakter jako předchozí závislost č.1 (záporná polarita). Šířka svaru, oproti předešlé závislosti, má větší odchylky, a to v řádu desetin milimetru.

5.4 Závislost plochy svaru na vneseném teple

Výpočet vneseného tepla:

- Pouze pro laser:

$$Q_{las} = \frac{K_{las} \cdot P}{v_s} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (5.1)$$

- Hybrid Laser-TIG:

$$Q_i = \frac{(K_{las} \cdot P) + (K_{tig} \cdot U \cdot I)}{v_s} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (5.2)$$

Kde:

- P výkon [W]
- K_{las} koeficient účinnosti pro laser [-]
- K_{tig} koeficient účinnosti pro LaserTIG [-]
- U elektrické napětí [V]
- I elektrický proud [A]
- v_s svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Vzorové příklady:

Př.1) Laser

-svařovací parametry: $P=1800 \text{ W}$

$$K_{\text{las}}=0,75$$

$$v_s=20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$Q_{\text{las}} = \frac{0,75 \cdot 1800}{20} = 67,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (5.1)$$

Př.2) Laser-TIG -10A

-svařovací parametry: $P=1800 \text{ W}$

$$K_{\text{las}}=0,75$$

$$K_{\text{tig}}=0,6$$

$$U=14 \text{ V}$$

$$I=10 \text{ A}$$

$$v_s=20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$$

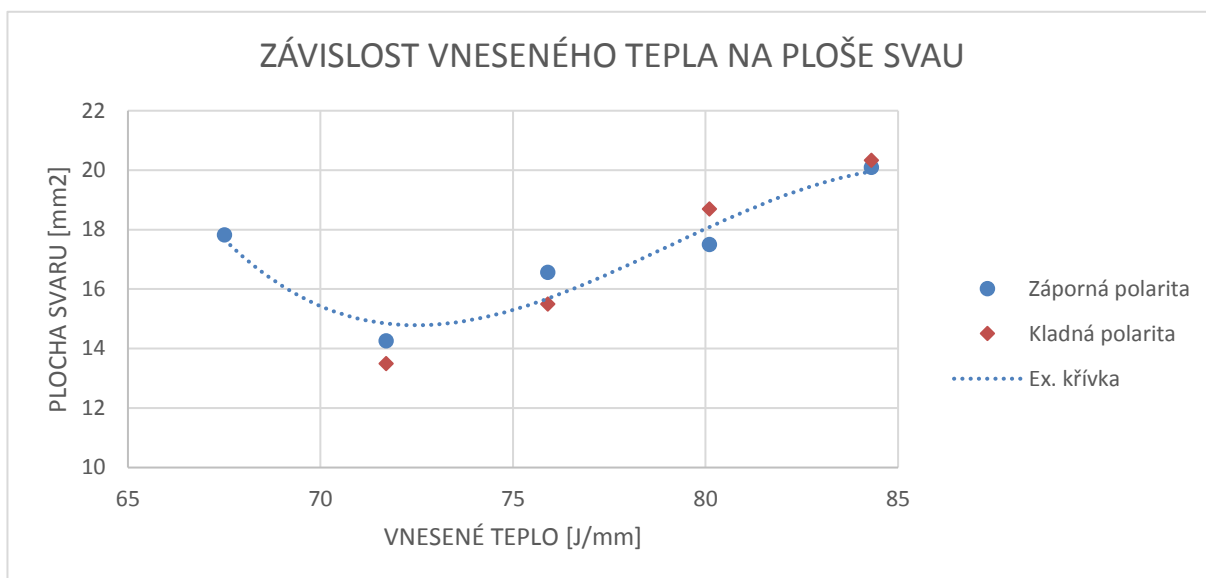
$$Q_i = \frac{(0,75 \cdot 1800) + (0,6 \cdot 14 \cdot 10)}{20} = 71,7 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (5.2)$$

Výpočet vneseného tepla hybridního laser-TIG svařování pro kladnou a zápornou polaritu se liší pouze v koeficientu účinnosti K_{tig} . Tento koeficient účinnosti pro zápornou polaritu nebyl dohledán, avšak předpokládáme pouze minimální změnu hodnoty vneseného tepla. Proto aproximujeme hodnoty kladné polarity na zápornou polaritu (tzn. $Q_2=Q_6$; $Q_3=Q_7$; $Q_4=Q_8$; $Q_5=Q_9$).

Vypočítané hodnoty byly zpracovány do tabulky 8 a grafu (obr. 39).

Tab. 8 Vypočítané vnesené teplo.

Číslo vzorku	Plocha svaru [mm ²]	Vnesené teplo Q[J*mm]	Svařovací proud [A]
1	17,82	67,5	0
2	14,26	71,7	-10
3	16,56	75,9	-20
4	17,5	80,1	-30
5	20,1	84,3	-40
6	13,5	71,7	10
7	15,5	75,9	20
8	18,7	80,1	30
9	20,33	84,3	40



Obr. 39 Graf závislosti vneseného tepla na ploše svaru.

Z grafu (obr. 39) je patrné, že hodnoty vneseného tepla a plochy svaru se zvětšují se svařovacím proudem. Kladná a záporná polarita mají minimální vliv na velikost plochy svaru, ty se liší pouze v řádu desetin milimetrů.

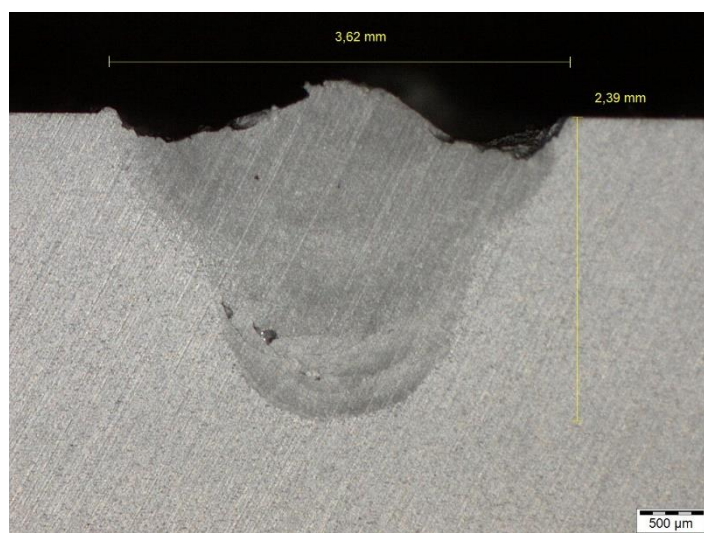
5.5 Analýza svarových vad

Tato část experimentu se zabývala analýzou svarových vad. Jak už bylo popsáno v předešlé kapitole (4.2.1), nejčastější svarové vady hliníkových slitin jsou horké trhliny a pórovitost.

- Horké trhliny

Vznikají za předpokladu, že objem eutektika je příliš malý a dochází k neúplnému zaplnění prostoru mezi rostoucími dendrity (viz. 4.2.1). Tento typ trhlin byl analyzován pouze na jednom zkušebním vzorku, a to na vzorku č.1 (obr. 40), kde byl použit samotný laser. Detail horkých trhlin je vyobrazen na obrázku 41.

Přepokládáme, že zvolením vhodného přehřevu by se tvorba horkých trhlin omezila, nebo zcela zabránila.



Obr. 40 Příčný řez vzorkem č.1 (laser).



Obr. 41 Detail na horké trhliny u vzorku č.1.

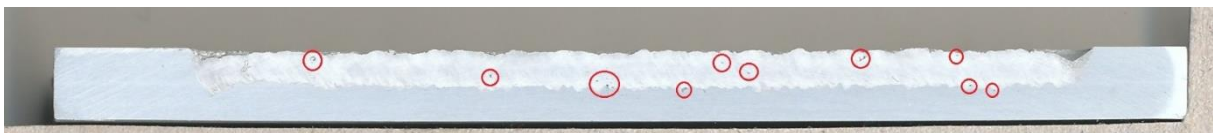
- Pórovitost

Pórovitost je zapříčiněna dynamikou keyhole a kmitáním svarové lázně. Když se spodní část keyhole zaškrtní, vzniká bublina, která svarovou lázní stoupá nahoru (viz. 4.2.1). Tento typ vady byl zkoumán na podélných řezech zkušebních svarů vyhotovených v první sérii.

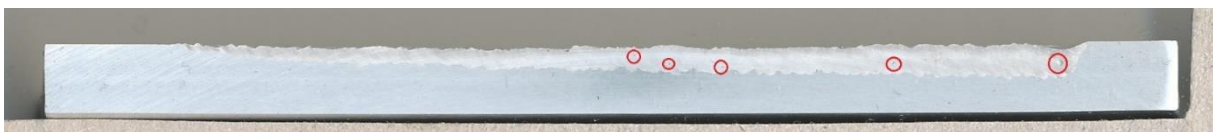
Pórovitost byla nalezena u všech vzorků, následně byla označena červenými kruhy pro lepší viditelnost (obr. 42 až obr. 52).



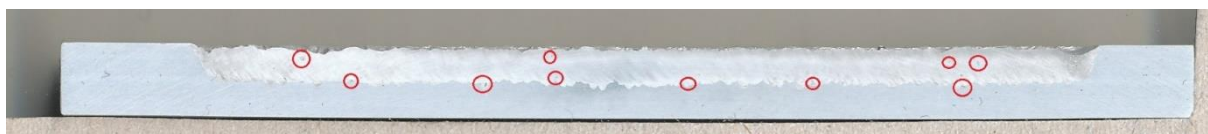
Obr. 42 Zkušební vzorek č.1 (Laser).



Obr. 43 Zkušební vzorek č.2 (Laser-TIG -10A).



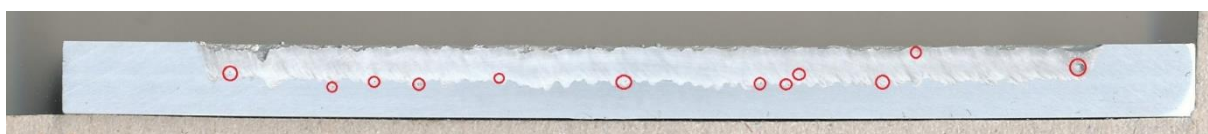
Obr. 44 Zkušební vzorek č.3 (Laser-TIG -20A).



Obr. 45 Zkušební vzorek č.4 (Laser-TIG -30A).



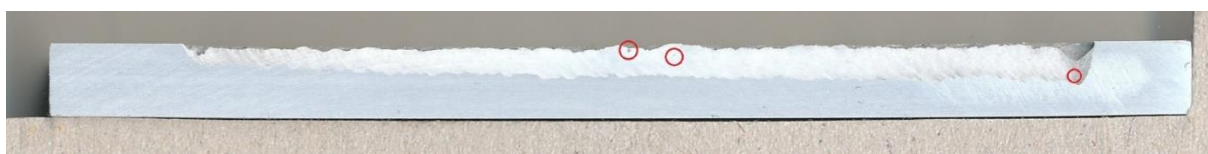
Obr. 46 Zkušební vzorek č.5 (Laser-TIG -40A).



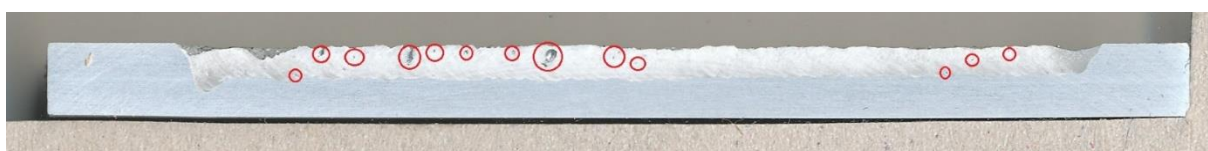
Obr. 47 Zkušební vzorek č.6 (Laser-TIG +10A).



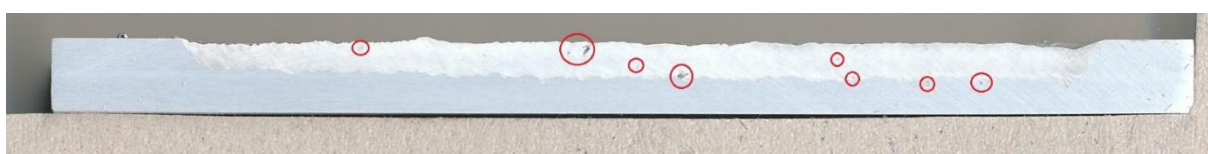
Obr. 48 Zkušební vzorek č.7 (Laser-TIG +20A).



Obr. 49 Zkušební vzorek č.8 (Laser-TIG +30A).



Obr. 50 Zkušební vzorek č.9 (Laser-TIG +40A).



Obr. 51 Zkušební vzorek č.10 (Laser-TIG střídavý 50A, 100Hz).



Obr. 52 Zkušební vzorek č.11 (Laser-TIG střídavý 50A, 500Hz).

Hlavní kritéria analýzy pórovitosti je kvantita a velikost ve výsledném svaru. U vzorku č.1 (samotný laser) je nízká koncentrace póru a bublin, což je v rozporu s našimi předpoklady: hybridní svařování Laser-TIG by mělo snižovat pórovitost slitin hliníku (viz. 3.3). Domníváme se, že nízká koncentrace je způsobena malým objemem svarové lázně.

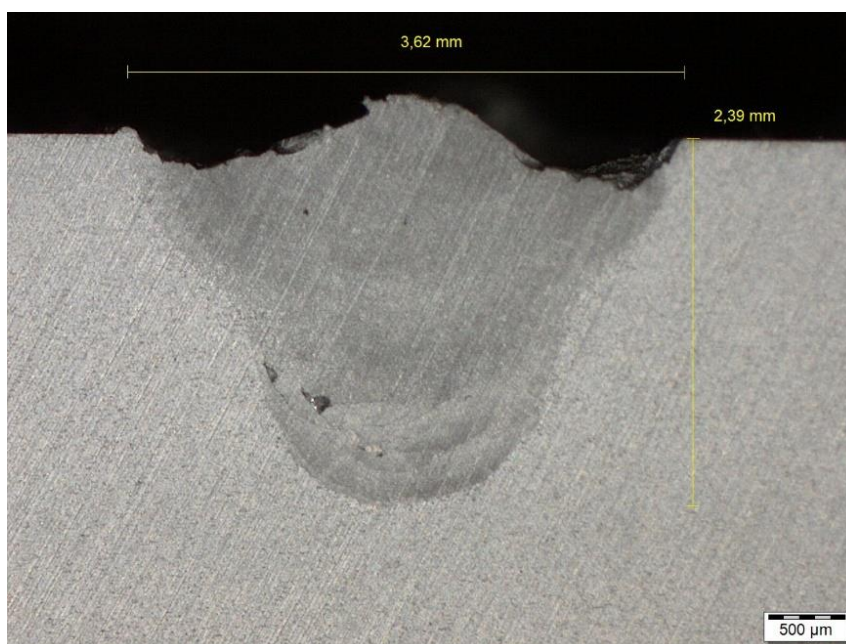
U záporné polarity se póry a bubliny vyskytují v různých polohách, u kořene a těsně pod povrchem svaru. U kořene je koncentrace póru vyšší.

U kladné polarity je výskyt obdobný jako u záporné polarity. Na vzorcích č.8 a 9 je koncentrace vyšší těsně pod povrchem svaru. Vzorek č.9 se vyznačuje nejvyšší koncentrací póru ze všech vzorků svařovaným stejnosměrným proudem TIG a samotným laserem.

Na svařovaných vzorcích pulzním proudem č.10 a 11, není koncentrace bublin a póru vyšší jak u vzorku č.9, ale vyznačuje se velkými rozměry. Domníváme se, že je to způsobeno kmitáním svarové lázně, která je rozpohybována střídání polarity svařovacího proudu.

5.6 Vizuální kontrola svaru

V této části je provedeno srovnání geometrie svaru samotného laseru, kladné a záporné polarity laser-TIG. Vyhodnocení je provedeno na základě normy ČSN EN ISO 5817.



Obr. 40 Příčný řez vzorkem č.1 (laser).



Obr. 53 Příčný řez vzorkem č.5 (laser-TIG -40A).



Obr. 54 Příčný řez vzorkem č.9 (laser-TIG +40A).

Pro vzorek č.1 (samotný laser) se geometrie svaru vyznačuje nadměrným převýšením. Pro zápornou polaritu (vzorek č.5 laser-TIG -40A) je svar charakterizován jako nadměrně asymetrický s významným propadem. U kladné polarity (vzorek č.9 laser-TIG +40A) nedochází k význačnému překročení geometrických norem. Svar je rovnoměrný s velmi malým propadem v levé části svaru.

Dle vizuální kontroly má kladná polarita nejlepší výsledky, ze všech svařovaných vzorků.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo osvojit si technologii laserového hybridního svařování a problematiku svařování hliníku. Dále provést experimentální studii závislosti svařovacího proudu na tvorbě svarových vad a geometrii svaru.

Experimentální část spočívala ve vytvoření zkušebních svarů na plechu tl.5 mm ze slitiny hliníku EN AW-5754 H11, na kterých byly dále zkoumány účinky procesních parametrů.

Experiment se zabýval závislostí svařovacího proudu na geometrii svaru. Šířka svaru, s výjimkou svařování samotným laserem, zůstává stejná pouze s malými odchylkami.

U záporné polarity jsou tyto odchylky v řádu setin milimetrů. Pro kladnou polaritu jsou odchylky větší, a to v řádech desetin milimetrů. Podle předpokladů se hodnoty šířky svaru liší dle použité polarity svařování, pro zápornou polaritu převažuje hodnota hloubky nad šířkou svaru. U kladné polarity je tomu naopak. Závislost hloubky svaru na svařovacím proudu má rostoucí téměř lineární průběh.

Dále byla na základě provedených experimentů vytvořena závislost vneseného tepla na ploše svaru. Se zvětšující se svařovacím proudem roste hodnota vneseného tepla. Kladná a záporná polarita mají minimální vliv na velikost plochy svaru, ty se liší pouze v řádu desetin milimetrů.

Na konec byla provedena analýza svarových vad. Nejčastější příčinou vzniku svarových vad u hliníkových slitin je vysoká rychlost ochlazování, která vede k tvorbě horkých trhlin a pórovitosti. Horké trhliny byly analyzovány pouze na zkušebním vzorku č.1, který byl svařován samotným laserem. To potvrzuje předpoklad, že prodloužení doby tuhnutí svarové lázně pomocí oblouku TIG sníží tvorbu horkých trhlin.

Pórovitost byla hodnocena na základě kvantity a velikosti. Pro zápornou polaritu převažovala koncentrace póru a bublin u kořene svaru, avšak byly analyzovány i těsně pod povrchem svaru. U kladné polarity je kvantita a výskyt obdobný jako u záporné polarity, s výjimkou vzorku č. 9 (+40 A), kde je koncentrace póru nejvyšší ze všech vzorků. Na svařovaných vzorcích střídavým proudem (č.10 a 11), není koncentrace bublin a póru větší jak u vzorku č.9, ale vyznačují se velkými rozměry. Domníváme se, že je to způsobeno kmitání svarové lázně, která je rozpořívána střídáním polarit svařovacího proudu. Z těchto důvodů je použití střídavých proudů pro svařování hliníku nevhodné. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím malého (rozmezí 20 až 30 A) stejnosměrného proudu a kladné polarity. To je potvrzeno vizuální kontrolou svaru, u které kladná polarita proudu dosáhla nejlepších výsledků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Car manufacturers. *The Throttle* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://thethrottle.com/2011/05/30/car-manufacturers-do-it-one-peice-at-a-time-26-photos/>
2. Co je laserová technologie? *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
3. Diskový laser. *TRUMPF* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/
4. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
5. Hluboké svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hluboke-svarovani/
6. ZHOU, J. a H.L. TSAI. Hrbid Laser-Arc Welding. *Welding Processes* [online]. InTech, 2012 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.5772/50113. ISBN 978-953-51-0854-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/welding-processes/hrbrid-laser-arc-welding>
7. ED. BY FLEMMING OVE OLSEN. *Hybrid laser-arc welding*. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press [u.a.], 2009. ISBN 978-143-9802-144.
8. Kondukční svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukni-svarovani/
9. Kontinuální vláknový laser. *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/kontinualni-vlaknovy-laser>
10. Laserové gravírování. *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-gravirovani-c>
11. Laserové popisování. *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-popisovani>
12. Laserové řezání [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.lasery.wz.cz/laserove_rezani.html
13. Laserové svařování. *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani>
14. Laserové svařování. *LaserTherm* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
15. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ. *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86/laserove-svarovani-kovovych-materialu-88>
16. Laserové vrtání. *LINTECH* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-vrtani>

-
17. KESSE, Martin Appiah. *Laser-TIG hybrid welding process* [online]. 2013 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2>
 18. AUTORŮ, kolektiv. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
 19. Mezníky technologie TIG AC/DC pro svařování hliníku. Automig [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://automig.cz/fileadmin/pub/doc/pdf/V%C3%BDvoj%20TIG%20ACDC%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
 20. Nd:YAG laser [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://lasery.wz.cz/nd-yag_laser.html
 21. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
 22. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ a Karel NĚMEC. *Neželezné kovy a jejich slitiny I* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf
 23. Polovodičové (diodové) lasery [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://lasery.wz.cz/polovodicove_lasery.html
 24. Poslední trendy ve svařování laserem. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem.html>
 25. Použití laserů. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/791-pouziti-laseru>
 26. PRŮMYSLOVÉ LASERY. LAO - Lasery a optika [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laserove-roboticke-systemy--691k/prumyslove-lasery-748k>
 27. Rozdělení laserů. LASCAM systems [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
 28. Řezání CO2 laserem. Konstrukce [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>
 29. HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. LAO - Lasery a optika [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
 30. LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). LAO - Lasery a optika [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
 31. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). LAO - Lasery a optika [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
 32. ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. LAO - Lasery a optika [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

-
33. Svařování slabých plechů. KONSTRUKCE [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-slabych-plechu/>
 34. Svařování TIG. Alfin-Trading [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.alfin-trading.cz/clanek/svarovani-tig/1>
 35. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. Technologie svařování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
 36. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
 37. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser [online]. In: . [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2_013__mrna.pdf
 38. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser [online]. In: . [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_lasere_m_2013__mrna.pdf
 39. TIG (WIG). Automig [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
 40. TIG svařování I. SVARBAZAR [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
 41. TIG svařování II. SVARBAZAR [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008122801>
 42. TIG/WIG svařování. FRONIUS [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-48E32D67-70A72504/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3920.htm#.WSVONevyjDe
 43. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. CWS-ANB [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
 44. Vláknové mřížky a rezonátory. NETWORK GROUP [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://sfo.networkgroup.cz/cs/vlaknove-mrizky-a-rezonatory/>
 45. Využití laserů [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.lasery.wz.cz/vyuziti.html>
 46. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky [online]. In: . [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<u>Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Popis</u>
D_{la}	[mm]	Vzdálenost mezi laserem a elektrodou
I	[A]	Proud svařovacího zdroje TIG
K_{las}	[-]	Koeficient účinnosti pro laser
K_{tig}	[-]	Koeficient účinnosti pro laser-TIG
P	[W]	Výkon laseru
U	[V]	Napětí svařovacího zdroje TIG
v_s	[mm/s]	Svařovací rychlost
CW		Kontinuální
EL		Elektricky
G		Gravírování
K		Kalení
LD		Laserové diody
M		Mikro obrábění
N		Nanášení vrstev
QCW		Kvazi-kontinuální
RD		Radio-frekvenčně
Ř		Řezání
S		Svařování
TIG		Tungsten inert gas
TIG-AC		Svařování střídavým proudem
TIG-DC		Svařování stejnosměrným proudem
TOO		Tepelně ovlivněná oblast
Z		Značení

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Laserové svařování karosérie na montážní lince Fiat Fiorino.
- Obr. 2 Porovnání elektromagnetický záření zdroje světla.
- Obr. 3 Princip Nd: YAG laseru.
- Obr. 4 Princip diskového laseru.
- Obr. 5 Princip vláknového laseru.
- Obr. 6 Princip CO₂ laseru.
- Obr. 7 Princip diodového laseru.
- Obr. 8 Graf využití laserů v průmyslu.
- Obr. 9 Graf rozdělení aplikací laserového svazku dle pracovních parametrů.
- Obr. 10 Řezání laserem.
- Obr. 11 Princip značení laserem.
- Obr. 12 Příklady gravírovaných součástí.
- Obr. 13 Srovnání metod svařování.
- Obr. 14 Princip TIG svařování.
- Obr. 15 Strmá statická V-A charakteristika.
- Obr. 16 Princip TIG DC metody a) přímá polarita, b) nepřímá polarita.
- Obr. 17 Princip TIG AC metody.
- Obr. 18 Průběhy svařovacího proudu: tyristorové (vlevo), invertorové svářečky (vpravo).
- Obr. 19 Rozdíl mezi svary zhotovenými pulsním svařováním a bez pulzu.
- Obr. 20 Průběh pulsního proudu.
- Obr. 21 Ukázka penízkové svaru.
- Obr. 22 Uspořádání soustavy Laser-TIG.
- Obr. 23 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru.
- Obr. 24 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru s konstantním a) proudem b) rychlostí.
- Obr. 25 Schématické znázornění pracovních úhlu během metody TIG.
- Obr. 26 Závislost svařovací rychlosti na rozměrech svaru.
- Obr. 27 Vzdálenost mezi laserovým svazkem a netavící se elektrodou.
- Obr. 28 Závislost výkonu el. oblouku na hloubce průvaru.
- Obr. 29 Stabilita Laser-TIG a TIG svařování jako funkce rychlosti a proudu.
- Obr. 30 Rozdělení slitin hliníku dle rozpustnosti v tuhém stavu.
- Obr. 31 Typy vad ve svarech.
- Obr. 32 Rozpustnost vodíku v hliníku.
- Obr. 33 Zkušební svary.
- Obr. 34 Svařovací sestava Laser-TIG.
- Obr. 35 Detail svařovací hlavy.
- Obr. 36 Schéma řezání vzorků pro první (žlutá) a druhou (červená) sérii.
- Obr. 37 Graf závislosti č.1 (záporná polarita).

-
- Obr. 38 Graf závislosti č.2 (kladná polarita).
- Obr. 39 Graf závislosti vneseného tepla na ploše svaru.
- Obr. 40 Příčný řez vzorkem č.1 (laser).
- Obr. 41 Detail na horké trhliny u vzorku č.1.
- Obr. 42 Zkušební vzorek č.1 (Laser).
- Obr. 43 Zkušební vzorek č.2 (Laser-TIG -10A).
- Obr. 44 Zkušební vzorek č.3 (Laser-TIG -20A).
- Obr. 45 Zkušební vzorek č.4 (Laser-TIG -30A).
- Obr. 46 Zkušební vzorek č.5 (Laser-TIG -40A).
- Obr. 47 Zkušební vzorek č.6 (Laser-TIG +10A).
- Obr. 48 Zkušební vzorek č.7 (Laser-TIG +20A).
- Obr. 49 Zkušební vzorek č.8 (Laser-TIG +30A).
- Obr. 50 Zkušební vzorek č.9 (Laser-TIG +40A).
- Obr. 51 Zkušební vzorek č.10 (Laser-TIG střídavý 50A, 100Hz).
- Obr. 52 Zkušební vzorek č.11 (Laser-TIG střídavý 50A, 500Hz).
- Obr. 53 Příčný řez vzorkem č.5 (laser-TIG -40A).
- Obr. 54 Příčný řez vzorkem č.9 (laser-TIG +40A).

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání parametrů svařovacích metod.

Tab. 2 Porovnání parametrů typů laserů.

Tab. 3 Tabulka doporučených svařovacích parametrů pro metodu DC a AC.

Tab. 4 Značení slitin hliníku ke tváření.

Tab. 5 Svařovací parametry.

Tab. 6 Naměřené hodnoty rozměrů (záporná polarita).

Tab. 7 Naměřené hodnoty rozměrů (kladná polarita).

Tab. 8 Vypočítané vnesené teplo.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 - Materiálový list slitiny hliníku: EN AW-5754 H11

Příloha č.2 – Svařovací sestava s popisem

Příloha č.3 – Makrostruktura a rozměry zkušebních svarů

Příloha č.1 - Materiálový list slitiny hliníku: EN AW-5754 H11

Inspection certificate No. **163560AT**
EN 10204/3.1

Dodavatel (Supplier): Alcom Alval s.r.o. Křemenáčová 174/2 104 00 Praha-Pitkovice Česká republika IČ: 25352822 DIČ: CZ25352822 Tel: 554 773 052-5 Fax: 554 773 050 E-mail: hlinik@hlinik.cz	Odběratel (Consignee): AQUAdem, s.r.o. Tovární 739/1 643 00 Brno 43 Česká republika IČ: 25309340 DIČ: CZ25309340 Tel: +420 545 229 775 Fax: E-mail: som@aquadem.cz
--	---

Materiál (Material): BPL005005754H111
tl. 5,00 mm; PLECH; EN AW-5754 H111; EN 573-3, EN-485-1+A1,-2,-4; AlMg3; měkký
Rozměr (Dimension) [mm]: 1500x3000 mm
Množství (Quantity): 2,00 ks

Kupní smlouva (Contract): KS 1701984
 Objednávka (Purchase order): OV17-0394
 Dodací list (Shipping document): DLV 1701222
 Originální atest (OIC No.): 89031230 01/1
 Ze dne (Date): 10.11.2016
 Původ zboží (Origin): AT

Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrдость HB (Hardness)
23779/01	01/0078961/6	232	152	A50=24	-

Chemické složení (Chemical composition)[%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,28	0,36	0,05	0,33	3,2	0,05	0,06	0,03	-

Poznámka (Note):-

Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

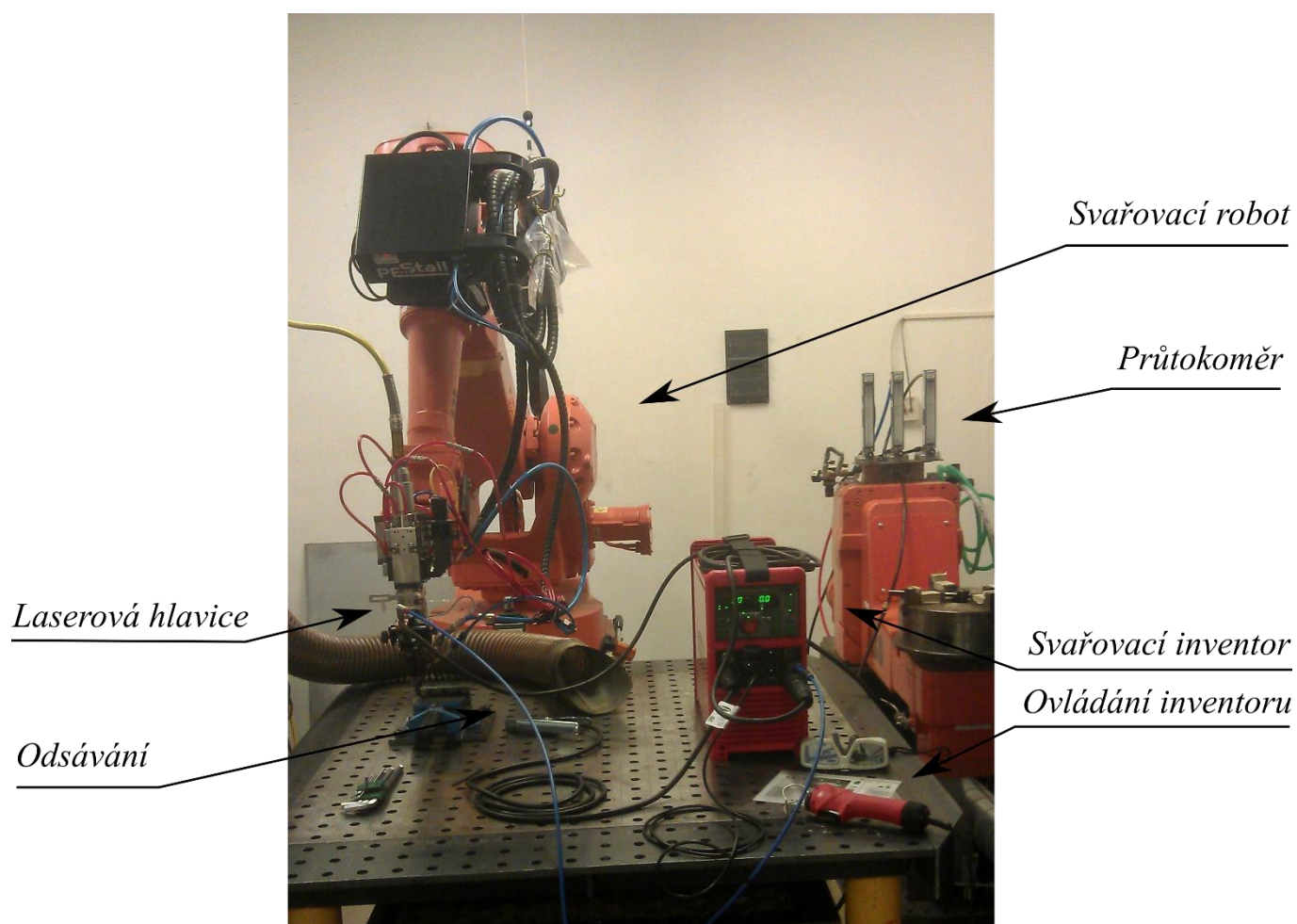
Razítko: 

Ivan Vodák
 IČ: 25352822
 DIČ: CZ25352822

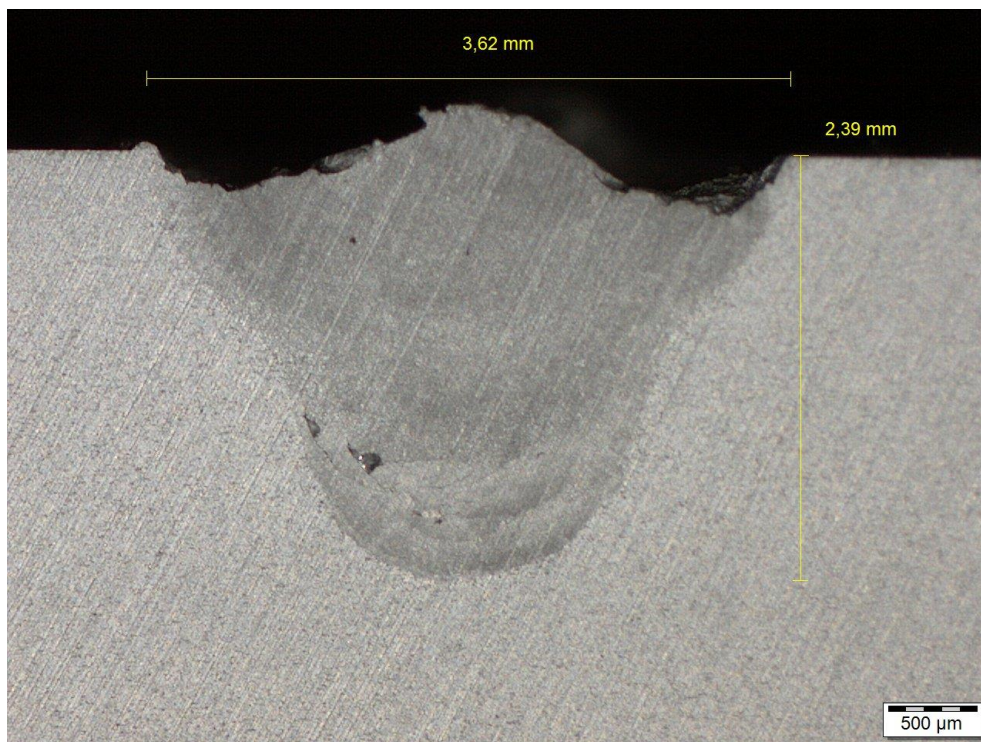
Alcom Alval s.r.o.
 Krnovská 1397/47
 792 01 Bruntál



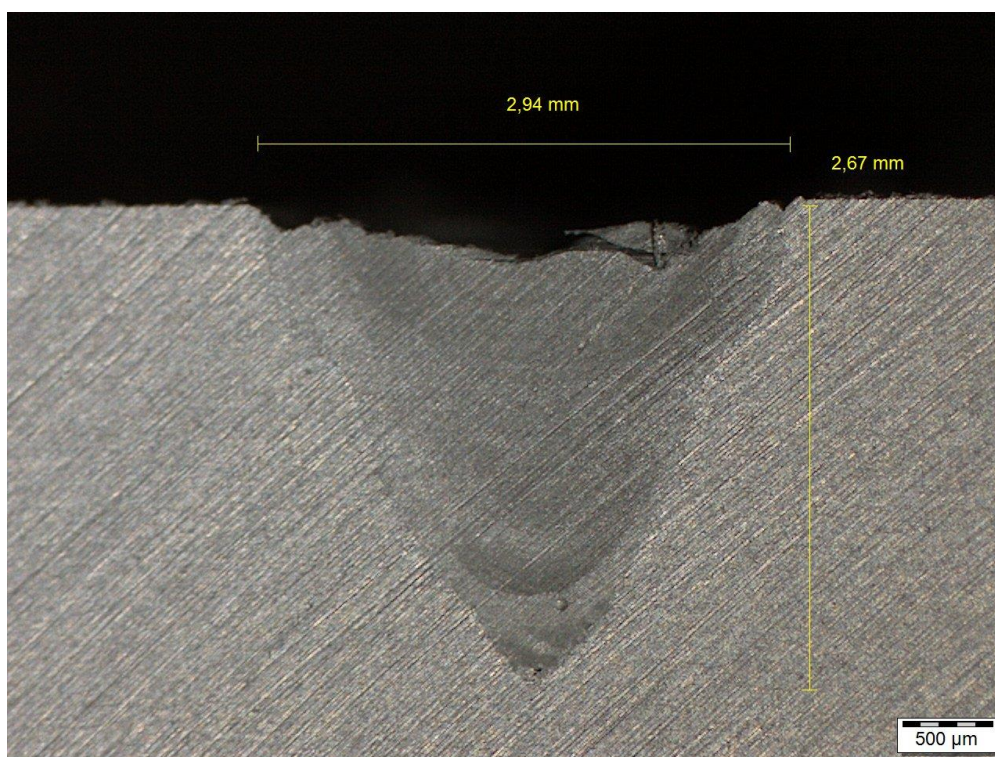
Příloha č.2 – Svařovací sestava s popisem



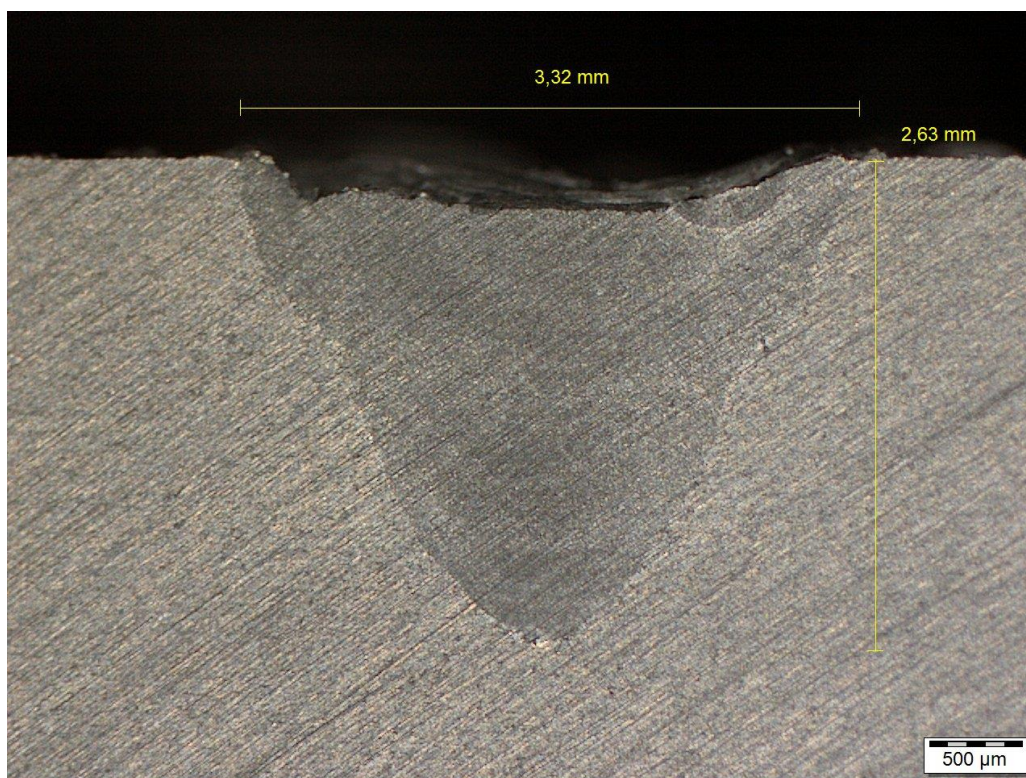
Příloha č.2 - Makrostruktura a rozměry zkušebních svarů



Svar zkušebního vzorku č.1 (Laser)



Svar zkušebního vzorku č.2 (Laser-TIG -10A)



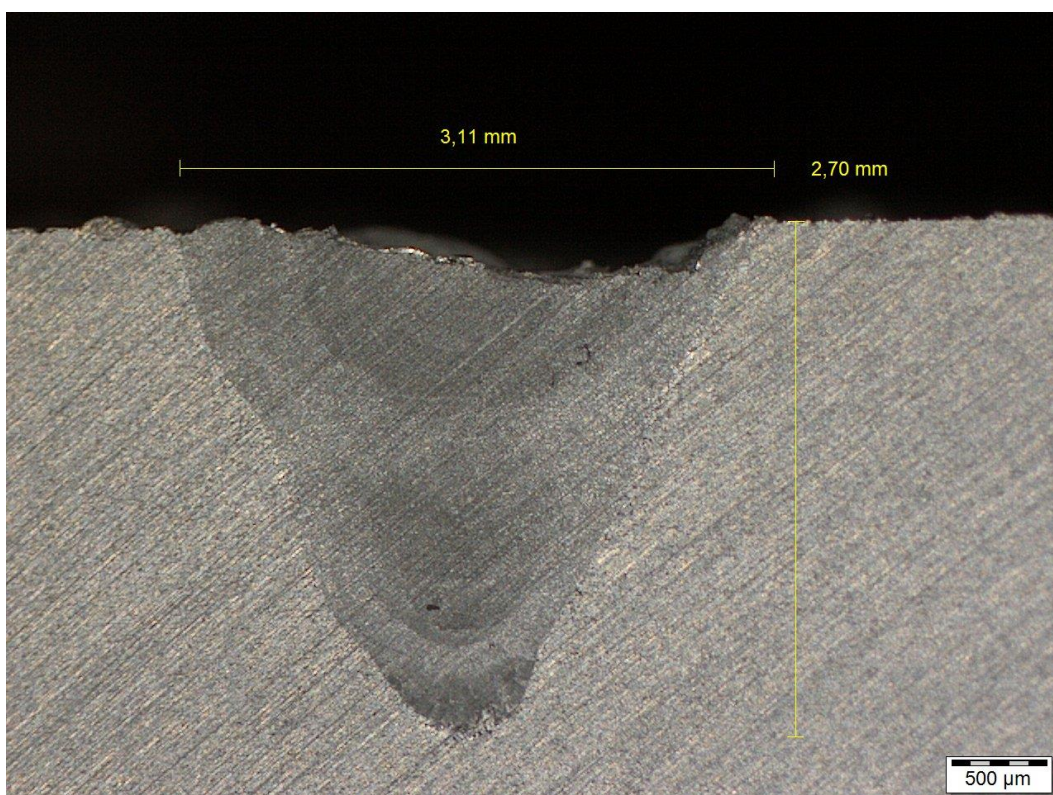
Svar zkušebního vzorku č.3 (Laser-TIG -20A)



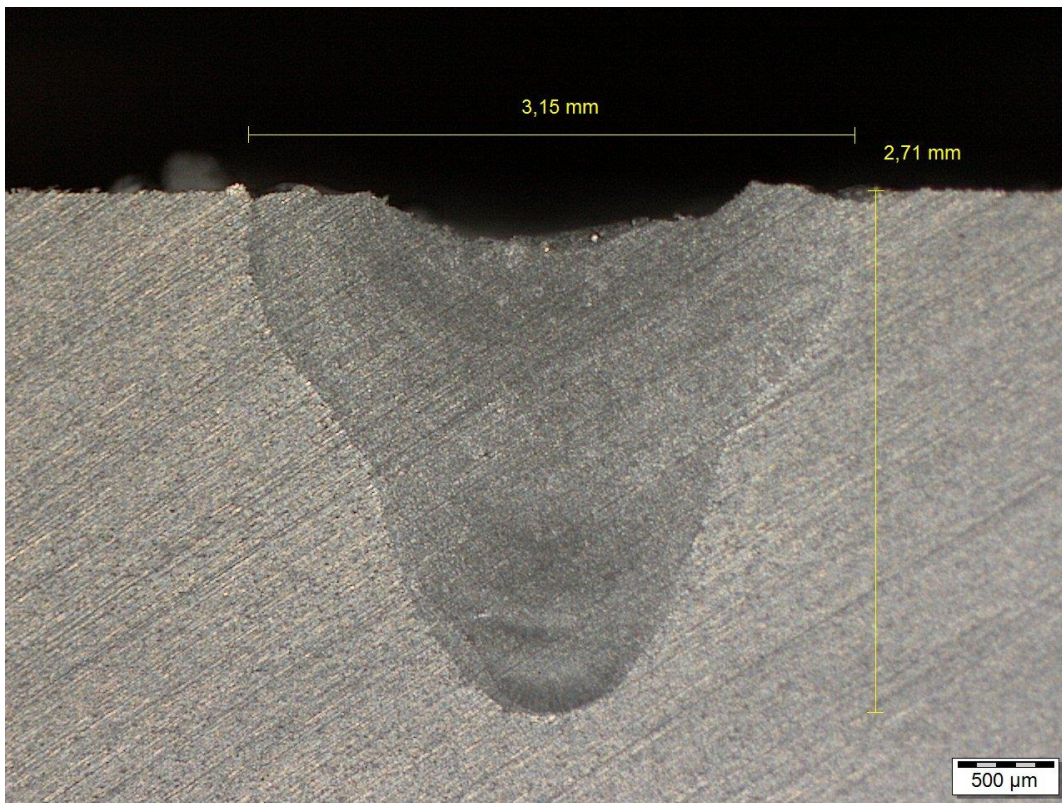
Svar zkušebního vzorku č.4 (Laser-TIG -30A)



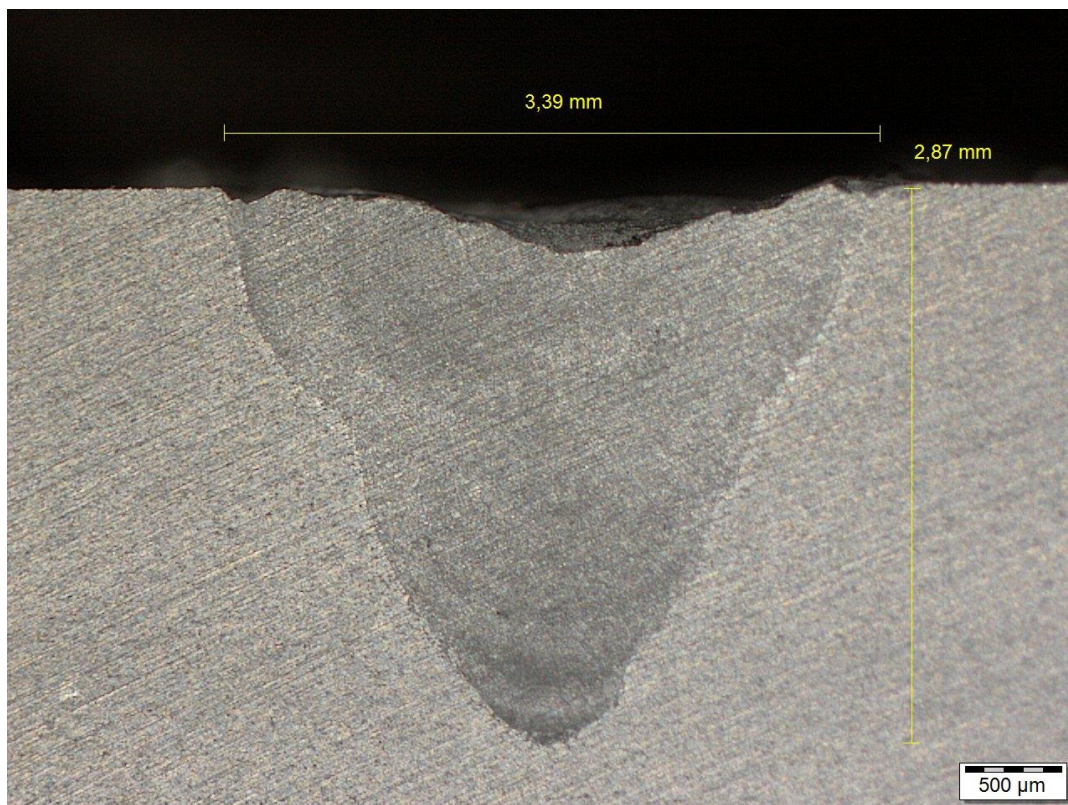
Svar zkušebního vzorku č.5 (Laser-TIG -40A)



Svar zkušebního vzorku č.6 (Laser-TIG +10A)



Svar zkušebního vzorku č.7 (Laser-TIG +20A)



Svar zkušebního vzorku č.8 (Laser-TIG +30A)



Svar zkušebního vzorku č.9 (Laser-TIG +40A)