



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG PRO SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

USE OF LASER-TIG HYBRID TECHNOLOGY FOR WELDING ALUMINIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Drápela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Petr Drápela
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
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 diplomové práce:

Využití hybridní technologie Laser–TIG pro svařování hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie laserového svařování hliníkových slitin naývá v automobilovém průmyslu stále většího významu. Úkolem práce je provést analýzu vlivu parametrů předehřevu pomocí elektrického oblouku z TIG hořáku na vlastnosti laserového svaru vybraných hliníkových slitin. Vzniklé svary vyhodnotit z hlediska makro a mikrostruktury a z hlediska mechanických vlastností, svarových vad.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování. Osvojit si problematiku svařování hliníku a jeho slitin. Osvojit si metody vyhodnocení vlastností svaru jak z hlediska mikrostruktury, tak z hlediska svarových vad a mechanických vlastností spoje.

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 diplomové 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

DRÁPELA PETR: VYUŽITÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG PRO SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Volba a nastavení vhodných parametrů během svařování hliníkových slitin řeší řadu problému, jako například volbu svařovací metody, rychlosti svařování a ovlivňuje mechanické vlastnosti svaru. Během svařování hliníkových slitin nastává obtíž v oxidaci tenké povrchové vrstvy materiálu. Jednou z možností, jak toto úskalí řešit, je použití hybridního laser-TIG svařování. V této diplomové práci je popsán vliv svařovacích procesů na mechanické vlastnosti dvou vybraných hliníkových slitin (EN AW-5754 H22, EN AW-6082 T6) a změna jejich mikrostruktury vlivem svařování.

Klíčová slova: laser, laserové svařování, hybridní svařování, laser-TIG, hliníkové slitiny

ABSTRACT

DRÁPELA PETR: USE OF LASER-TIG HYBRID TECHNOLOGY FOR WELDING ALUMINIUM ALLOYS

Different problems arise from choice of setting technological parameters during welding of aluminium alloys. Choice of welding method, welding speed and material influence mechanical properties of welds. During welding of aluminium alloys come difficulties due to oxidation of thin surface layer of material. One of ways how to overcome this obstacle is to use hybrid laser-TIG welding method. In this diploma thesis is described influence of welding processes on mechanical properties of two aluminium alloys(EN AW-5754 H22, EN AW-6082 T6) and change in their microstructure during welding.

Key words: laser, laser welding, hybrid welding, laser-TIG, aluminium alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁPELA, Petr. *Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování hliníkových slitin* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116796>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 24.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové 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 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Varianty řešení	11
2 NÁVRH ŘEŠENÍ	14
2.1 Laserové svařování	14
2.1.1 Charakteristika laserového paprsku	14
2.1.2 Rozdělení typů laserů v průmyslu	15
2.1.3 Princip laserového svařování.....	18
2.2 TIG svařování	20
2.2.1 Svařovací zdroje	21
2.2.2 Svařovací metody	21
2.2.3 Čistící efekt.....	25
2.3 Hybridní svařování Laser-TIG.....	26
2.3.1 Procesní parametry	27
2.3.2 Technologické parametry	31
2.4 Svařitelnost hliníkových slitin	32
2.4.1 Svarové vady	32
2.5 Mechanické zkoušky	34
3 EXPERIMENT	38
3.1 Materiálový rozbor.....	38
3.2 Vyhotovení zkušebních svarů	39
3.3 Metalografické analýza	42
3.3.1 Analýza makrostruktury	44
3.3.2 Analýza mikrostruktury	46
3.4 Výpočet vneseného tepla	50
3.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	52
3.6 Zkouška tahem	57
ZÁVĚRY	65

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [1]

Laser, od jeho objevení druhé polovině minulého století, našel širokou škálu uplatnění. V současnosti se lze s laserem setkat v lékařství při očních operacích, v metrologii při přesném měření délek a v neposlední řadě i ve zbrojním průmyslu u protiraketových systémů. Mezi jednu z mnoha aplikací se také řadí laserové svařování, které je zejména využíváno v automobilovém průmyslu pro výrobu karosérií. Jelikož je kladen nárok na snižování hmotnosti vozidel, jsou karosérie z velké části vyráběny z hliníkových slitin. Nicméně nesmí být opomenuty bezpečnostní normy, které kladou velké nároky na mechanické vlastnosti spojů. Problematikou svařování slitin hliníku spočívá v pasivační vrstvě oxidu hlinitého, která brání metalurgickému spojení a zapříčiňuje vznik nechtěné pórovitosti ve svarech. Jednou z možností svařování hliníkových slitin je technologie hybridního svařování laser-TIG, která úspěšně tuto problematiku potlačuje. Avšak velké množství procesních parametru sťažuje optimální nastavení stabilního svařovacího procesu. Proto je nutné tuto technologii podrobit důkladnému výzkumu, abychom plně využili její potenciál.

Cílem této diplomové práce je osvojení si technik laserového svařování, a především problematiku svařování hliníku a jeho slitin. Dalším krokem je experimentální stanovení parametrů výrobního procesu provedením analýzy vlivu přehřevu pomocí elektrického oblouku na vlastnostech svaru. Analýza bude provedena na dvou vzorcích hliníkových slitin a bude vyhodnocena výsledná mikro a makrostruktura. To bude dále doplněno o zhodnocení mechanických vlastností svařovaných spojů.



Obr. 1 Laserové svařování na montážní lince. [1]

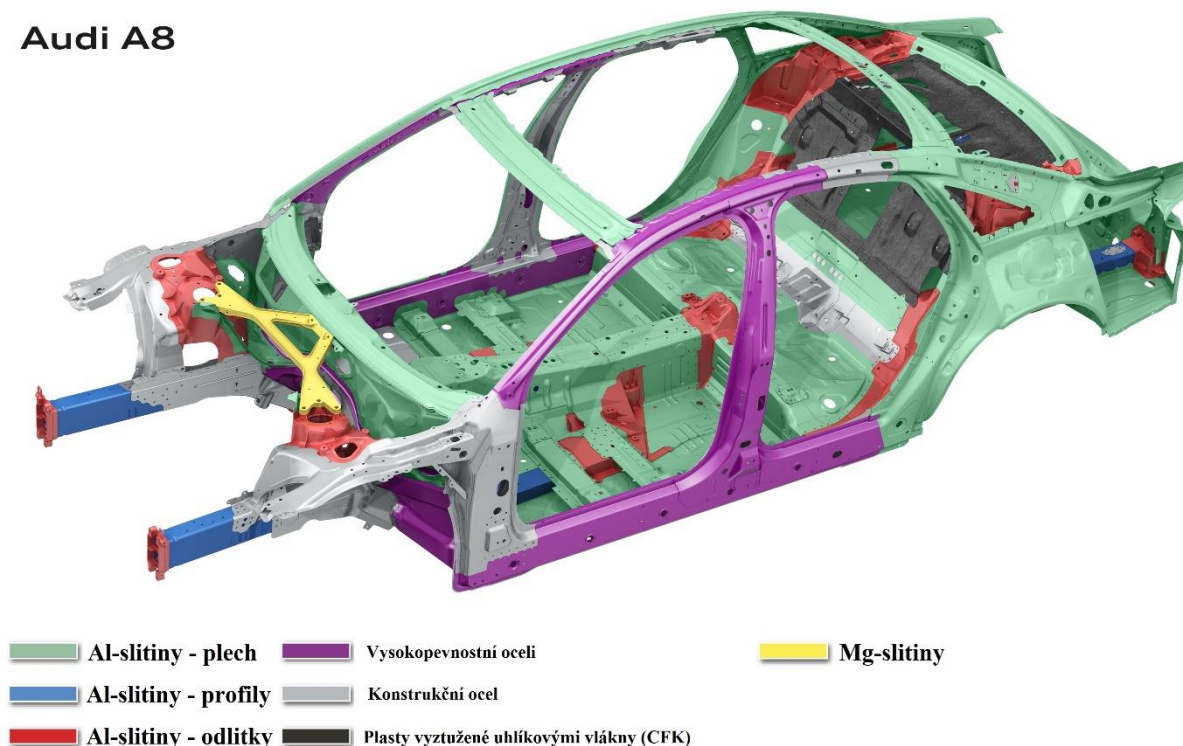
1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [3], [4], [5].

Politicko-enviromentální požadavky na nižší spotřebu paliva a omezení tvorbu emisí, vyvíjí nátlak na výrobce v automobilovém průmyslu. Jedna z možností řešení je snižování hmotnosti vozidel, zejména v oblasti karoserií. Výzkumy prokázaly, že úspory hmotnosti vozů použitím hliníkových slitin mohou dosahovat téměř 40% v porovnání s ocelovými karosériemi. Rozsah využití demonstruje pohled na karosérii vozu Audi A8 (obr. 2). Avšak na úkor snížení hmotnosti se nabízí problém s technologickým řešením spojování těchto materiálů. Současné konvenční metody nenabízí variabilitu mezi dostačujícími mechanickými vlastnostmi spoje a časovou náročností technologie, která souvisí s automatizací výroby.

Řešeným problémem je spojování slitin hliníku v automobilovém průmyslu, a to konkrétně EN AW-5754 H22 a EN AW-6082 T6. Výsledný spoj musí splňovat určité mechanické vlastnosti, nejméně na úrovni základního materiálu. Současně použitá technologie musí být adaptovatelná pro automobilový průmyslu – možnost automatizace, krátké provozní časy atd. Cílem je navrhnout vhodnou technologii, která by splňovala tyto aspekty.

První část práce se bude zabývat teoretickým rozбором řešené problematiky, o který se následně bude opírat experimentální část. Nejprve bude v praktické části materiálová rozvaha, která umožní detailnější poznání svařovaných slitin. Následně bude popsán samotný proces vyhotovení zkušebních svarů a metalografických vzorků, z kterých bude provedena vizuální analýza makro i mikrostruktury. Dále budou vzorky zkoumány z hlediska mechanických vlastností pomocí zkoušky tvrdosti dle Vickerse a tahové zkoušky. Na závěr bude zhodnocení naměřených výsledků a stanovení vlivu technologie a procesních parametrů na kvalitu svarového spoje.

Audi A8



Obr. 2 Karosérie Audi A8 [2]

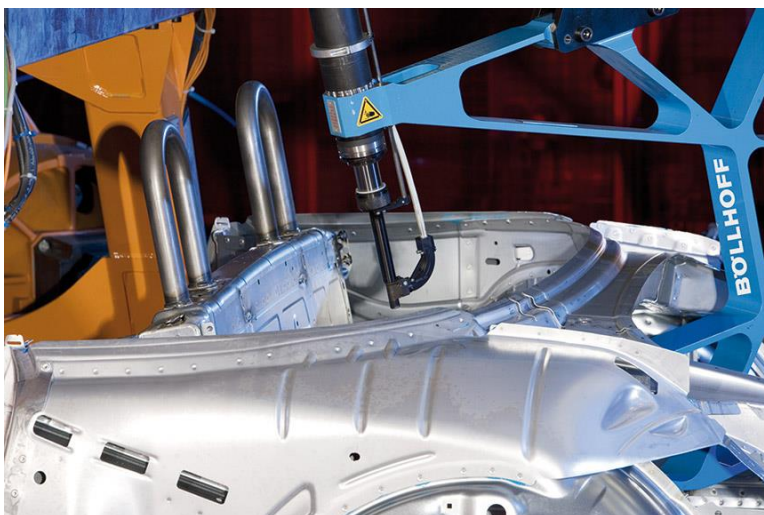
1.1 Varianty řešení [6], [7], [8],[9], [10], [11],[12], [13], [14],[15], [16], [17],[18], [19], [20], [21]

Hliníkové slitiny lze spojovat několika současně používanými technologiemi, popřípadě i jejich kombinací. Avšak z předem zmiňovaných aspektů byly vyřazeny některé z konvenčních metod: svařování plamenem, svařování oblenou elektrodou. Vhodnost uvažovaných technologií je posuzována zejména z hlediska tvorby kvalitního spoje, produktivity, spolehlivosti výrobních zařízení a s tím související ekonomiky provozu.

Uvažované jsou následující technologie:

- Nýtování

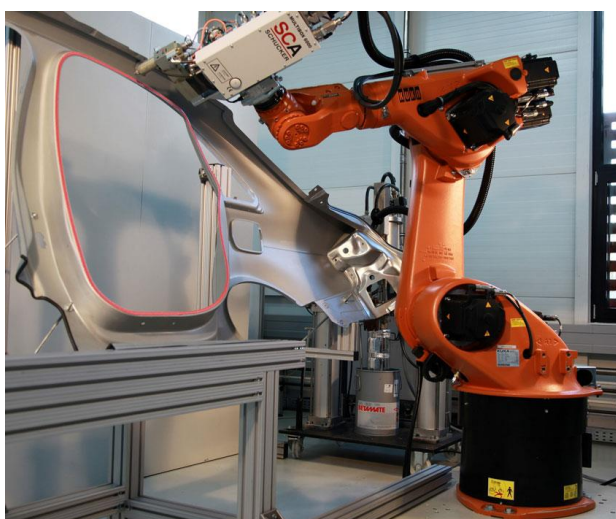
Technologií nýtování lze vytvářet nerozebíratelný spoj dvou a více materiálů. Existuje široký výběr materiálů používaných na výrobu nýtu – ocel, hliník, barevné kovy a v neposlední řadě termoplasty. Při volbě nýtovacího materiálu musíme dbát zejména na jeho dobrou tvářitelnost, která nám zaručí snadné zhotovení výsledného spoje. Dále na vysokou pevnost ve smyku a také v neposlední řadě na nízkou měrnou hustotu materiálu (hmotnost). Nýtování je využíváno zejména v dopravním průmyslu. V automobilovém se hojně využívá při výrobě karosérii, kde je nejvíce používána metoda tzv. self-piercing (obr. 3). Hlavní výhodou této technologie je spojování různých materiálů bez tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 3 Nýtovací metoda Self-piercing. [10]

- Lepení

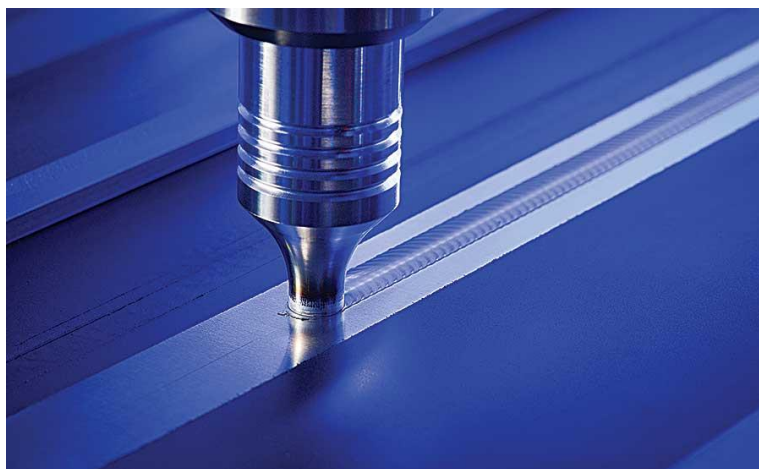
Technologie (obr.4) vytváření nerozebíratelný spoj dvou stejných, popřípadě různých materiálů pomocí lepidla. Výsledná kvalita spoje závisí zejména na spojovacím médiu – lepidlu. Musí splňovat dvě základní podmínky: dobrou přilnavost k lepenému materiálu (adheze) a samotnou soudržnost lepidla (koheze). Před aplikací lepidla musí být lepený povrch důkladně upraven, v první řadě odmaštěn, poté může následovat otryskání, popřípadě další technologické postupy. V případě lepených spojů nedochází k tepelně ovlivněné oblasti, jsou těsné, odolné proti korozi a lze spojovat i velmi tenké materiály.



Obr. 4 Technologie lepení [13]

- Svařování metodou FSW (Friction Stir Welding)

Poměrně nová a progresivní metoda třecího svařování, je založena na principu vtačování rotujícího tvarového nástroje do svarové mezery. Svařovací proces probíhá za teplot pod bodem solidu, kde rotací dochází k „rozmíchání“ materiálu obou spojovaných částí. Vlivem nízké teploty procesu nedochází k naplynění svarového spoje, které je charakteristické pro tavné svařování. Z tohoto důvodu není potřeba použití ochranné atmosféry během svařovacího procesu. Je možné spojovat materiály, které nelze svařit konvenčními metodami tavného svařování, zejména slitiny hliníku a dalších neželezných kovů. Při svařování dochází vlivem vzniklého tepla v TOO ke změnám struktury, zejména u materiálu tvářených za studena a vytvrzovatelných slitin. Výsledné spoje jsou velmi vysoké kvality-bez pórů, oxidických vměstků a trhlin. Výzkumy umožnili rapidní rozvoj této technologie a vznik několika modifikací, které rozšiřují možnosti uplatnění. Tyto adaptace spočívají např. v použití několika tvarových nástrojů (Twin-stir), mírnému sklonu nástroje (Skew-stir) nebo cyklické změny rotace během procesu (Re-stir).



Obr. 5 Svařovací metoda FSW[15]

- Svařování metodou MIG

Zkratka metody MIG vznikla z anglického názvu „Metal Inert Gas“, což můžeme volně přeložit jako svařování v ochranné atmosféře inertního plynu (obr. 6). Jedná se o obloukovou svařovací metodu tavící se elektrodou, která je dodávána motorizovaným pohonem dle pokynů svářeče. Inertní plyn slouží k ochraně svarové lázně, tzn. pouze zamezuje přístupu vzduchu a neúčastní se žádných chemických procesů. Nejvíce používaný inertní plyn je argon, popřípadě jeho směs s heliem. Svařovací metoda MIG je využívána pro svařování neželezných kovů, jako je hliník, měď, titan a jejich slitiny.



Obr. 6 Svařovací metoda MIG [19]

- Svařovací metoda TIG

Metoda obloukového svařování, která probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu, pomocí netavící se wolframové elektrody. Svařovací metoda má dvojitý označení: TIG z anglického „Tungsten Inert Gas“, WIG z německého „Wolfram Inert Gas“, jedná se o totožnou metodu. Ve většině případech se jedná o ruční svařovací metodu, avšak může být i plně automatizována. Lze svařovat s přídavným i bez přídavného materiálu. Metoda (obr. 7) může být aplikována na širokou škálu materiálu: vysokolegované a korozivzdorné oceli, slitiny na bázi hliníku, titanu a mědi.



Obr. 7 Svařovací metoda TIG [20]

- Laserové svařování

Svařování pomocí laserového paprsku je založeno na vysoké plošné hustotě energie svazku, který je zaostřen na povrch materiálu. Kde dochází k částečné absorpci svazku a následnému vývinu tepla v místě styku. Díky vysoké hustotě energie laseru, se výsledné svary vyznačují velkou štíhlostí a malou tepelně ovlivněnou oblastí. Laserové svařování je využíváno zejména v automobilovém průmyslu, lze svařovat nízkouhlíkové i korozivzdorné oceli, a také slitiny na bázi titanu. Hlavní předností je vysoká svařovací rychlost, výborná flexibilita, opakovatelnost a možnost automatizace.

- Hybridní svařování Laser-TIG

Jedná se o spojení dvou předešlých metod, tedy svařování laserem a svařovací metoda TIG. Jako primární zdroj tepla je využíván laserový svazek, který plní hlavní funkce svařovacího procesu, jako je hloubka průvaru. Sekundární zdroj tepla TIG slouží pouze jako předehřev a podporuje stabilitu svařovacího procesu. Využívá se zejména pro slitiny hořčíku, korozivzdorné oceli.

S ohledem na koncepci použití hliníkových slitin v automobilovém průmyslu, byla zvolena metoda hybridního svařování laser-TIG. V následující kapitole budou stanoveny teoretické podklady, které nám umožní širší náhled na danou problematiku a následnou realizaci experimentální části.



Obr. 8 Laserové svařování karosérie. [21]

2 NÁVRH ŘEŠENÍ

2.1 Laserové svařování [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [40]

Metoda svařování pomocí laseru se řadí mezi metody svařování bez použití přídavného materiálu. Jedná se o moderní, velmi populární a velmi efektivní metodu určenou pro různé druhy kovů jako například konstrukční a nerezová ocel, hliník, měď a v neposlední řadě i titan. Tato metoda se vyznačuje vysokou svařovací rychlostí, přesností a kvalitou svaru. Velkou výhodou laserového svařování je nízká tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou jsou naopak vyšší pořizovací náklady na laserová svařovací centra. Díky možnosti snadného zavedení do automatizované výroby a také možnosti online kontroly je laserové svařování využíváno v různých odvětvích průmyslu. Srovnání parametrů této metody s ostatními běžně používanými metodami je uvedeno v tabulce 1.

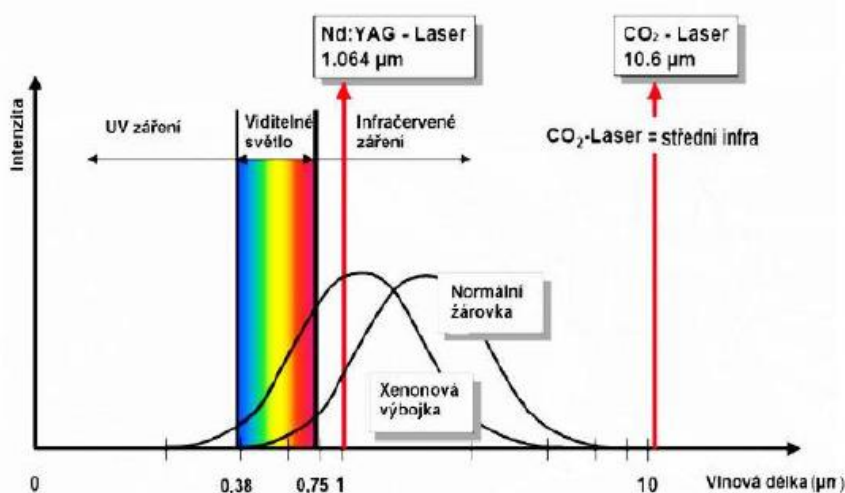
Tab. 1 Porovnání parametrů svařovacích metod. [36]

Metoda svařování	Hustota energie [W·cm ⁻²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka svaru [mm]	Svařovací rychlost [m·mm ⁻¹]
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

2.1.1 Charakteristika laserového paprsku [38], [41], [46]

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation neboli laser je zdroj elektromagnetického záření, který funguje na principu zesílení světla stimulovanou emisí záření, jež popisuje kvantová mechanika a termodynamika. Objev laseru v roce 1960 znamenal velký průlom v mnoha průmyslových i vědeckých odvětvích.

Laserový svazek je charakteristický těmito vlastnostmi: koherencí, monochromaticností, malou divergencí svazku a možností snadné fokusace svazku. Koherence popisuje vzájemnou souvislost mezi amplitudou a fází vlny. Jsou-li dvě vlny koherentní, pak tyto vlny mohou spolu interferovat, čehož se užívá například v interferenční mikroskopii.



Obr. 9 Porovnání elektromagnetický záření zdroje světla. [41]

Laserový svazek je charakteristický svojí barvou, jelikož generované fotony jsou emitovány z určité primární energiové hladiny a mají tedy stejnou primární frekvenci. Fotony jsou ale v malém množství také emitovány z energiových hladin okolo primární hladiny, díky čemuž má laserový svazek charakteristický profil – tzv. Gaussovský profil. Oproti běžným zdrojům světla jako například výbojky a žárovky, je laser výkonnější a má malou rozbíhavost svazku (malou divergenci). Vysoký výkon s sebou přináší nutnost chlazení. V průmyslových aplikacích je důležitá snadná fokusace svazku – zaostření laserového paprsku do malého bodu, díky čemuž se velmi zvýší plošná hustota energie. Na obrázku 9 je znázorněno elektromagnetické laserové záření v porovnání s dalšími běžnými zdroji světla.

2.1.2 Rozdělení typů laserů v průmyslu [22], [25], [29], [30], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [40]

Lasery je možné rozdělit podle skupenství aktivního prostředí, vlnové délky, buzení, režimu práce, výkonu, životnosti a v neposlední řadě podle použití v průmyslu. Podle energie – podle vlnové délky – lze lasery dělit na rentgenové, ultrafialové, lasery ve viditelném spektru a infračervené lasery. Excitace laserů – buzení – může být realizováno optickým zářením, elektrickým výbojem a polem, chemickou reakcí, tepelnými změnami atd. Lasery mohou pracovat v režimu pulzním, kontinuálním (spojitým) anebo impulsním. Jejich výkon se pohybuje od 3 W až do 100 kW. V tabulce 2 jsou uvedeny nejčastěji používané typy laserů včetně jejich parametrů.

Tab. 2 Porovnání parametrů typů laserů. [36]

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
					až 5kW	Ř, S		
		EL	~25%		až 20kW	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

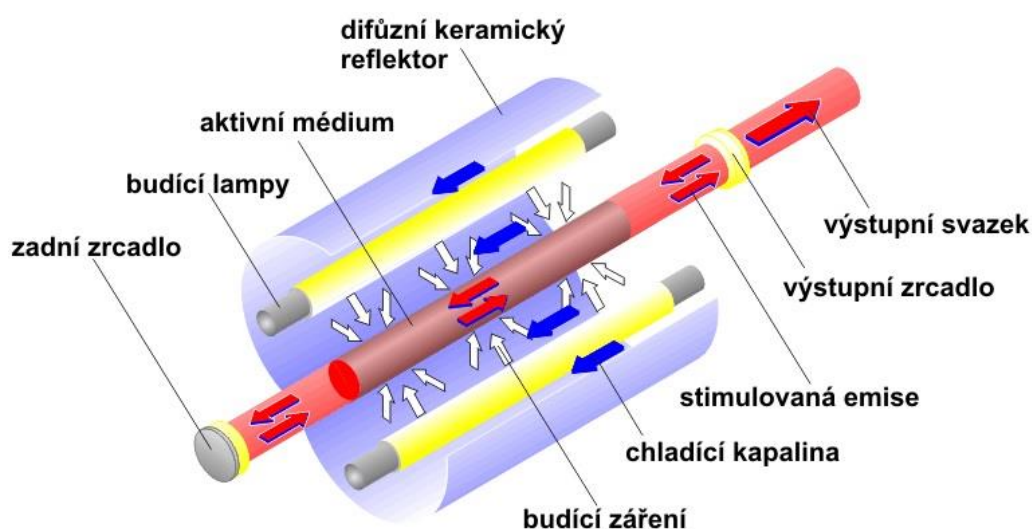
Ř – řezání

S – svařování

Z – značení

- Nd: YAG laser

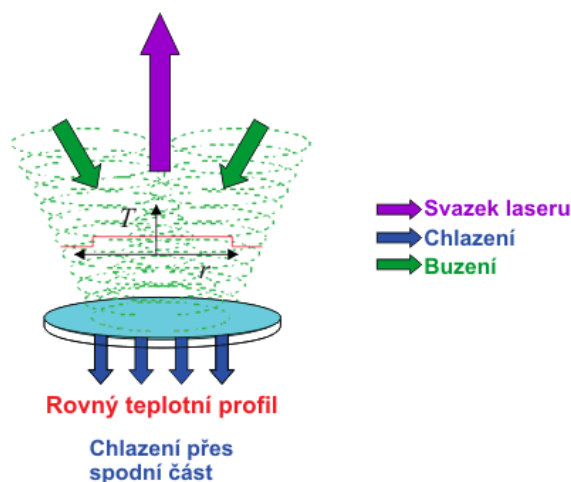
K buzení pevnolátkových laserů se využívá optické záření – nejčastěji xenonová výbojka (LPSS – Lamp Pumped Solid State) nebo laserové diody (DPSS – Diode Pumped Solid State). Nejstarším pevnolátkovým a také vůbec nejstarším laserem je rubínový tyčový laser, který se v současnosti užívá velmi málo. Byl nahrazen polovodičovými lasery též označované vláknové lasery a diskovými lasery. V průmyslu je rozšířen yttriumaluminiový granát s příměsí neodymu Nd:YAG, yterbia Yb:YAG nebo chromu Cr:YAG. U pevnolátkových laserů je kladen důraz na jejich chlazení z důvodu zahřívání krystalů. U buzení prostřednictvím xenonových výbojek je oproti buzení laserovými diodami malá účinnost přeměny elektrické energie na světelnou a je tedy nutné větší chlazení – nejčastěji vodou. I přes tuto skutečnost je častěji voleno buzení laseru xenonovými výbojkami. Princip Nd:YAG laseru je zobrazeno na obrázku 10.



Obr. 10 Princip Nd: YAG laseru. [36]

- Diskový laser

Diskový laser, viz obrázek 11, funguje na obdobném principu jako Nd:YAG. Pouze aktivního prostředí má tvar tenkého disku o poloměru okolo 10 mm a tloušťce 0,25 mm. Díky vysokému výkonu (až 16 kW) je vhodný na svařování a řezání.



Obr. 11 Princip diskového laseru. [36]

- Vlákňový laser

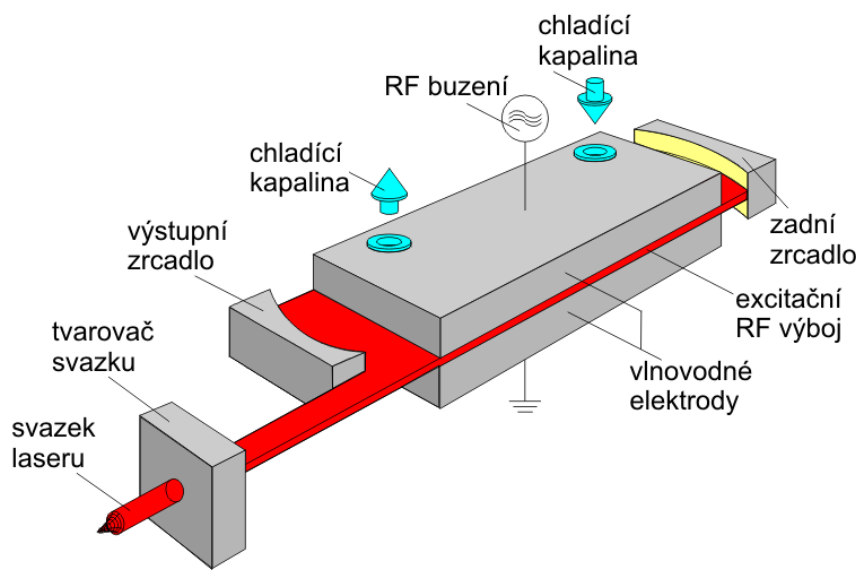
Nejmodernějším typem pevnolátkových laserů je vlákňový laser, jehož princip je ukázán na obrázku 12. Světelné toky z velkoplošných multimódových laserových diod jsou vedeny několika optickými vlákny, která jsou spojena prostřednictvím multimódové spojky. Poté procházejí Braggovskými mřížkami, a nakonec jsou vyvázány výstupním kolimátorem. Díky dlouhému (v řádech metrů) yterbiem dopovanému optickému vláknu, které je aktivním prostředím, jsou zde sníženy náklady na chlazení. Dalšími výhodami je dlouhá životnost budících diod, nízká spotřeba elektrické energie, vysoká účinnost, malé rozměry a minimální požadavky na údržbu.



Obr. 12 Princip vlákňového laseru. [36]

- Plynové lasery

Princip nejběžnějšího plynového laseru je zobrazen na obrázku 13. CO₂ laser využívá směs plynů hélia, dusíku a oxidu dusičného jako aktivní prostředí. Dalším zástupcem je He-Ne laser, charakteristický malou rozbíhavostí svazku, díky čemuž je vhodný k zaměřování a jako zdroj světla v mikroskopech. Výkon těchto laserů se běžně pohybuje v rozmezí 0,5 až 20 kW, ale může dosahovat až 200 kW. Buzení je zde realizováno buď elektrickým výbojem, nebo rádiový frekvenčně. Aktivní plyn cirkuluje mezi dvěma elektrodami a celý okruh je chlazen – nejčastěji difúzně, což je velmi efektivní. Jejich výhodou jsou nízké provozní náklady a spolehlivost. Nízké výkony se užívají při gravírování a popisování, vyšší výkony naopak u řezání, potažmo u svařování. Jelikož je zde svazek světla veden pomocí zrcadel, je nutné správně zkalibrovat zrcadla.



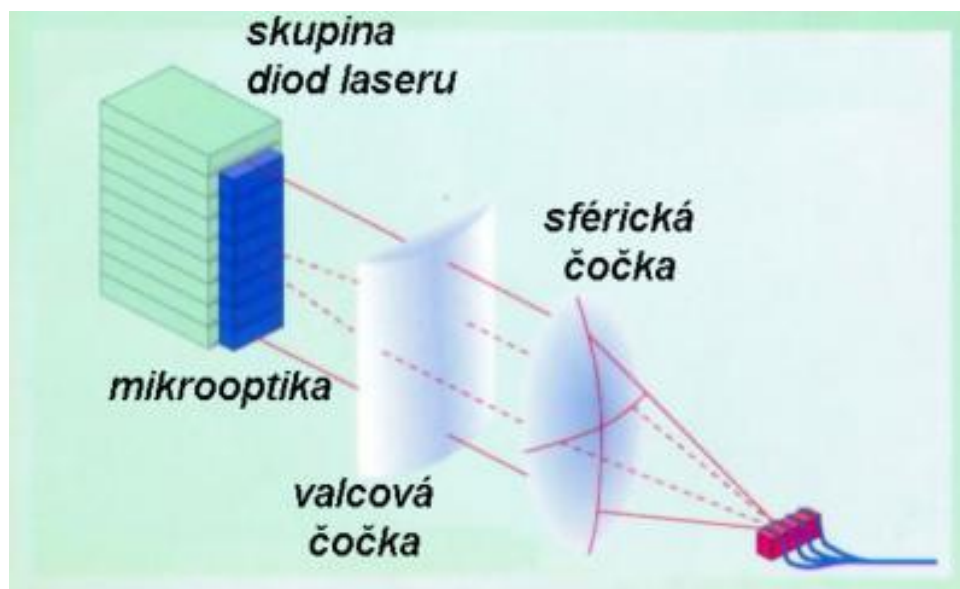
Obr. 13 Princip CO₂ laseru. [36]

- **Kapalinové lasery**

Kapalinové lasery využívají jako aktivní prostředí roztoky organických barviv (především fluorofory) a k buzení se část užívá jiný laser. Jejich velkou výhodou je možnost nastavení vlnové délky (od 300 nm až po 1500 nm). Avšak v průmyslových aplikacích nejsou tyto lasery využívány z důvodu degradace aktivního prostředí.

- **Diodový laser**

Tyto lasery využívají polovodiče nebo příměsové polovodiče jako aktivní médium (aktivními částicemi jsou nerovnovážné elektrony a díry), které je buzené elektronovým svazkem nebo elektrickým proudem. Mezi jejich přednosti patří vysoká účinnost, regulace výkonu a možnost přeladění vlnových délek. Nevýhodou je rozbíhavost svazku vystupujícího z laseru. Zástupcem polovodičového laseru je velmi rozšířený diodový laser. Ten využívá jako aktivní prostředí galium arsenid (GaAs), kadmium sulfid (CdS) a kadmium selen (CdSe) a jeho výstupní paprsek tvoří obdélníkové plochy. Polovodičové lasery se využívají v různých průmyslových aplikacích, ve výpočetní technice a při Rapid Prototyping. Princip diodového laseru je vysvětlen na obrázku 14.



Obr. 14 Princip diodového laseru. [36]

2.1.3 Princip laserového svařování [23], [24], [26], [27], [28], [37], [39]

Během interakce laserového svazku s povrchem materiálu dochází k absorpci dopadajícího záření, které vede k rapidnímu zvýšení teploty v místě ozáření. Vzhledem k tomu, že se jedná o dynamický proces, dochází k natavení, nebo i dokonce k odpaření materiálu. V souvislosti s probíhajícími ději v materiálu lze laserové svařování dělit na:

- Kondukční režim – přeměna energie na teplo nastává na povrchu
- Penetrační režim – přeměna energie nastává pod povrchem materiálu

Zmíněné režimy se liší především plošnou hustotou výkonu laserů a jejich použitím.

- **Kondukční režim svařování**

Během kondukčního režimu se tepelná energie v materiálu šíří vedením (kondukcí) a nedochází k znatelnému odpařování materiálu. Plošná hustota výkonu laseru dosahuje řádově $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Obecně lze tuto metodu charakterizovat malou hloubkou svaru (desetina milimetru). Svařovací rychlost je vyšší právě na úkor malé hloubky průvaru. Ovšem v aplikacích, kde je nutné volit rychlost před průvarem, nachází tato metoda uplatnění. Proto se tato metoda používá pro svařování transparentních plastů, ale je nutné navíc použít absorpční látku. Ta lépe pohlcuje energii laserového svazku. Vzniklé teplo taví povrch svařence a po dokončení interakce laseru s materiálem vzniká svar. Správným nastavením svařovacích parametrů lze dosáhnout navenek téměř neviditelných svarů.

- **Penetrační režim svařování**

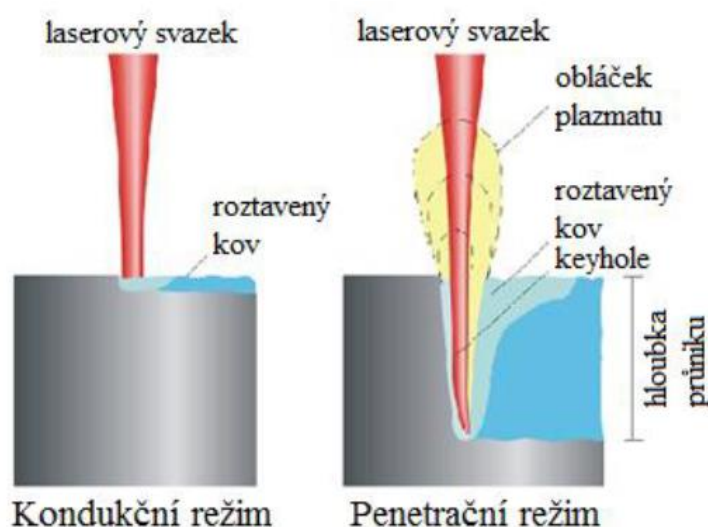
Ve srovnání s kondukčním režimem svařování, plošná hustota výkonu laseru u penetračního režimu dosahuje vyšší hodnoty, řádově $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Laserový svazek je optickou sestavou zaostřen do bodu, kde dochází k vysoké koncentraci energie. Vysoká hodnota plošné koncentrace energie způsobuje vysokou rychlost ohřevu materiálu, teplo se nestačí odvádět a dochází ke vzniku „keyhole“ efektu. Princip zmíněných režimů lze pozorovat na obrázku 13.

Keyhole efekt je pojmenován podle svého specifického tvaru, jelikož se jedná o velice úzký a hluboký otvor, který představuje kapiláru. Energie laseru se přeměňuje na teplo na stěnách keyhole a tím pádem penetruje materiál do hloubky. Tento útvar je naplněn plyny roztaveného materiálu a obklopen taveninou. Rovnováhou mezi kapilárními účinky taveniny a tlakem přítomných plynů dochází k rovnováze. Díky ní nedochází k uzavření tohoto útvaru.

Keyhole se přemísťuje zároveň s pohybem zaostřeného bodu laseru. S pohybem je kapilára obtékána roztaveným kovem. V opačném směru vůči směru pohybu zaostřeného bodu roztavený kov tuhne a tím se vytváří svar. Ten je zpravidla úzký, homogenní, málo tepelně ovlivněný a disponuje velkou hloubkou (oproti kondukčnímu

režimu). Tato metoda laserového svařování se používá především u kovů.

Mezi výhody laserového svařování se řadí vysoká kvalita svaru, spolehlivost, opakovatelnost, malá tepelně ovlivněná oblast, procesní stabilita a rychlost. Naopak mezi nevýhody této technologie patří vysoké pořizovací náklady a technická instrumentální náročnost.

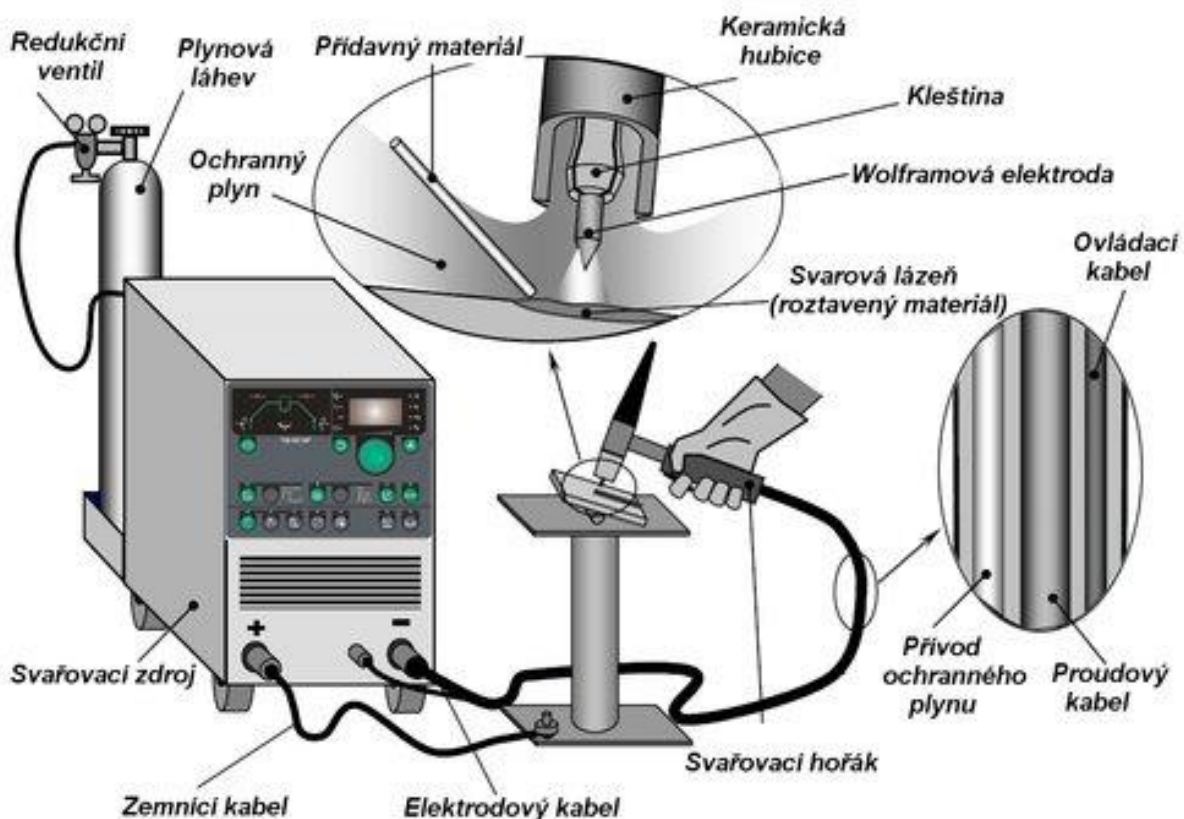


Obr. 13 Srovnání metod svařování. [39]

2.2 TIG svařování [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50]

Tungsten Inert Gas neboli obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Tato svařovací metoda, může být použita pro široké spektrum materiálů, jako například: legované a nástrojové oceli, hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, titan, nikl a bronz. Principem je přenos elektrické energie obloukem mezi wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem. Během tohoto přenosu je základní materiál nataven, přičemž netavící se wolframová elektroda pouze zprostředkovává hoření oblouku. Proto musí být materiál dodáván ručně nebo mechanickým způsobem. Jak název napovídá, inertní plyn (nejčastěji argon nebo helium) zajišťuje ochrannou atmosféru v okolí svaru a brání roztavenému materiálu v oxidaci.

Jelikož bývá většinou materiál dodáván ručně, je tato technika značně ovlivněna zručností svářeče. Ovšem, při dodržení daných technologických postupů, lze dosáhnout vysoké kvality svarů. Výhodou této metody je možnost svařování celé řady různých materiálů. Obrázek 14 ilustruje princip TIG svařování a svařovací sestavu.

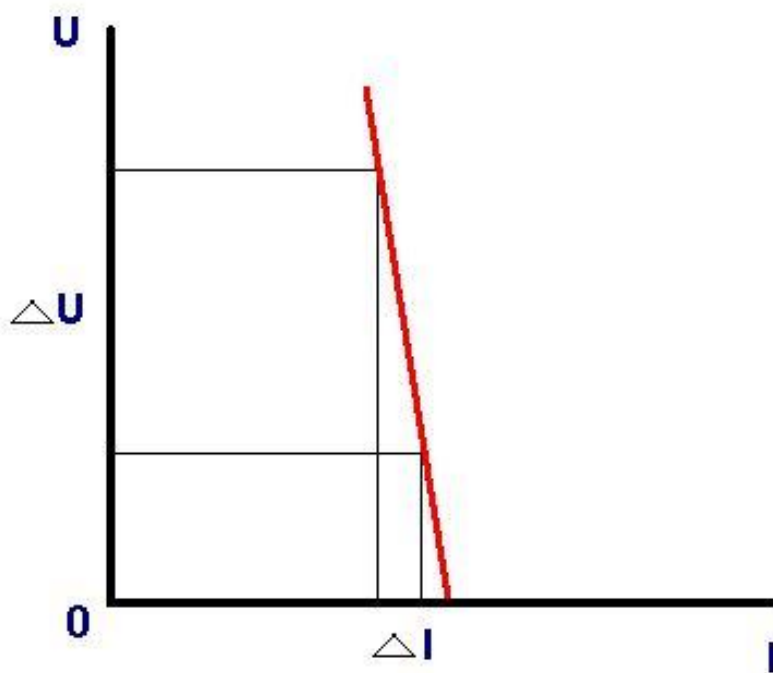


Obr. 14 Princip TIG svařování. [47]

2.2.1 Svařovací zdroje [49], [50]

Aby byl zajištěn elektrický oblouk mezi wolframovou elektrodou a svařencem, musí zdroje elektrické energie splňovat následující požadavky: strmá voltampérová charakteristika, plynulá regulace proudu a konstantní výstupní proud. Nejlépe těmto požadavkům vyhovují tyristorové zdroje s usměrňovačem a invertorové zdroje. Nevýhodou tyristorových zdrojů je nízká účinnost, způsobená vyhlazením proudu výstupní tlumivkou. Naopak nyníjší invertorové zdroje jsou vysoce flexibilní vůči změnám během procesu svařování. Značnou roli hraje zdrojové napětí. Zatímco jsou tyristorové zdroje napájen pomocí klasického síťového napětí, pro činnost invertorových zdrojů je nutné pulsní napětí o vyšších napětích. To ovlivňuje výslednou konstrukci zařízení, přičemž invertorové zdroje mohou být daleko kompaktnější a lehčí jak zdroje tyristorové.

Aby při větších změnách napětí během svařování docházelo k malým změnám proudu, je nutná strmá statické voltampérová charakteristika. Tento fakt lze pozorovat na obrázku 15, kde je znázorněn graf strmé V-A charakteristiky.



Obr. 15 Strmá statická V-A charakteristika. [49]

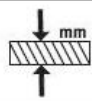



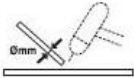



2.2.2 Svařovací metody [42], [43], [44], [45], [46], [49]

Tak jako u svařování obalenou elektrodou, svařování metodou TIG lze rozdělit dle použitého proudu na tři základní procesy

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

Vzhledem k jednotlivým technikám svařování se musí dodržet požadavky, které shrnuje tabulka 3 (Označení AC a DC plyne z anglických zkratk pro střídavé a stejnosměrné napětí.)

Tab. 3 Tabulka doporučených svařovacích parametrů pro metodu DC a AC. [44]

			I_2					
		(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	

- Svařování stejnosměrným proudem

Metoda využívající stejnosměrný proud se dále dle zapojení okruhu dělí na metodu přímou a nepřímou. Během svařovacího procesu v přímé konfiguraci je na záporný proud připojena wolframová elektroda a na opačný pól se připojuje svařovaná součást. Opačným způsobem je tomu u nepřímé metody, kdy je wolframová elektroda připojena ke kladnému zdroji napětí, zatímco svařovaný materiál je připojen k zápornému pólu zdroje.

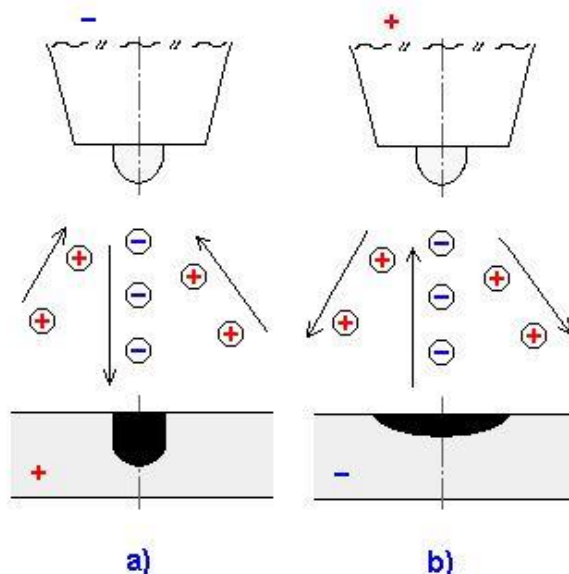
a) Přímá metoda (TIG DC-)

Prakticky se zapojení realizuje připojením TIG hořáku na zápornou svorku svářecího zdroje. Svařenec uzavírá oblouk kladnou svorkou a proud elektronů směřuje ze záporně připojeného TIG hořáku ke svařovanému materiálu. Teplo, které vzniká v důsledku přenosu elektrické energie, je v poměru 2/3 na svařenci a 1/3 na elektrodě. Větší množství energie přeměněné na teplo ve svařenci vede k většímu natavení, což vede ke vzniku úzkých, hlubokých svarů.

Vzhledem k tomu, že při aplikaci této metody nenastává tzv. čistící efekt oblouku, nelze tento způsob svařování použít u materiálů s odolnou vrstvou oxidu (u hořčíkových a hliníkových slitin). Materiálem, u kterých není přítomna odolná vrstva oxidu, je ocel, měď, titan a nikl. Přímá TIG metoda tedy nachází použití pro svařování široké škály ocelí (přes nelegované až po legované, nerezové).

b) Nepřímá metoda (TIG DC+)

Praktické zapojení této metody je opačným případem metody přímé. Vzhledem k pohybu elektronů v takto realizovaném zapojení, dochází k zvýšenému zahřívání netavící se elektrody. Ta musí být intenzivně chlazena a může docházet i k jejímu natavení. Právě kvůli intenzivnímu chlazení jsou zvýšeny pořizovací a provozní náklady. Úskalí této metody způsobují, že je velmi málo používaná v praxi. Naopak výhodou tohoto procesu je čistící efekt, proto nachází své uplatnění u materiálů se silnou vrstvou oxidu. Bohužel její použití je limitováno svařováním materiálů malých tloušťek. Obrázek 16 znázorňuje princip metody TIG stejnosměrným proudem.

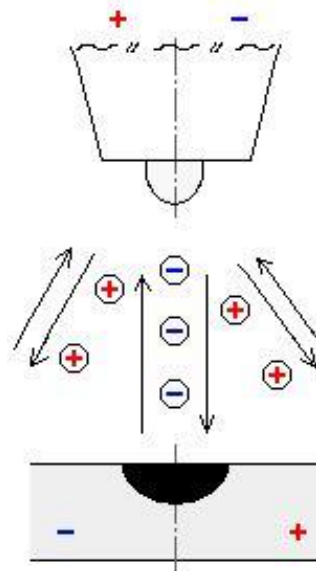


Obr. 16 Princip TIG DC metody a) přímá polarita, b) nepřímá polarita. [49]

- Svařování střídavým proudem

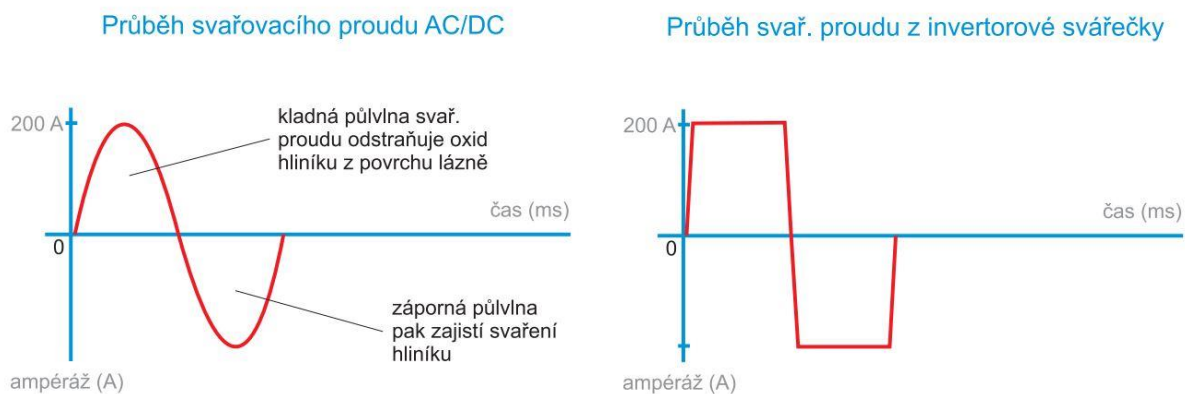
Kombinaci dvou výše zmíněných metod přináší svařovací metoda TIG AC, která spočívá v připojení střídavého elektrického zdroje na elektrody. Periodickým střídáním polarit TIG hořáku a svařence dochází ke spojení výhod přímé a nepřímé metody. Během první půl periody cyklu (nepřímé zapojení) z pravidla dochází ke vzniku čistícího efektu, zároveň se netavící elektroda značně přehřívá. Naproti tomu v druhé půl periodě cyklu je svařovaný materiál nataven a wolframová elektroda se ochlazuje.

Podle typu TIG AC svařovacích zařízení jsou časové průběhy střídavého proudu rozdílné. Starší typy svářeček jsou charakteristické sinusovým průběhem proudu, s neměnným poměrem mezi fází a frekvencí. Z toho plyne, že poměr čištění a svařování je stejný. To vede k příliš velkému čistícímu efektu. Nadbytečné je i zahřívání elektrody.



Obr. 17 Princip TIG-AC [49]

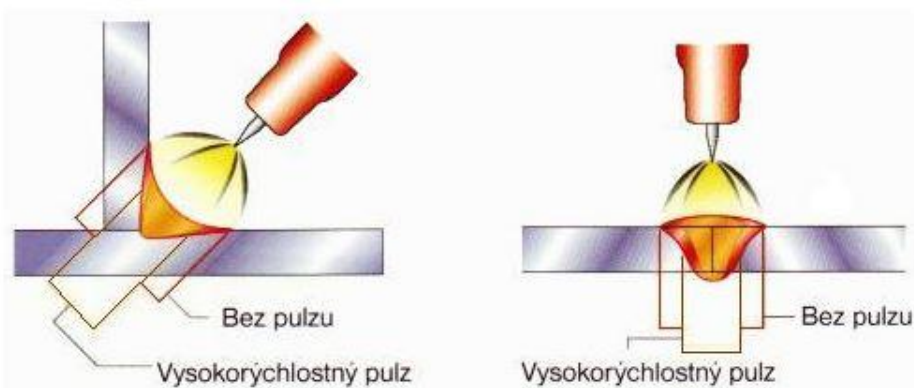
Moderní napěťové zdroje umožňují rozdílný průběh proudu (zejména obdelníkový) a lze ladit poměr mezi čistící a svařovací fází, ale i frekvenci střídavého proudu. Znázornění časových průběhů svařovacích proudů lze vidět na obrázku 18.



Obr. 18 Průběhy svařovacího proudu: tyristorové(vlevo), inverterové svářečky(vpravo).[42]

- Svařování impulsním proudem

Nejmodernější metodu TIG svařování představuje metoda s impulsním proudem. Během tohoto svařovacího procesu se pravidelně mění intenzita proudu mezi dvěma hladinami, tzv. základní a impulsní. Podle proudového zdroje je rozlišena závislost proudu na čase na: sinusovou, lichoběžníkovou, nebo pravoúhlou. Rozdíl mezi svařováním s pulsem a bez pulsu lze pozorovat na obrázku 19.

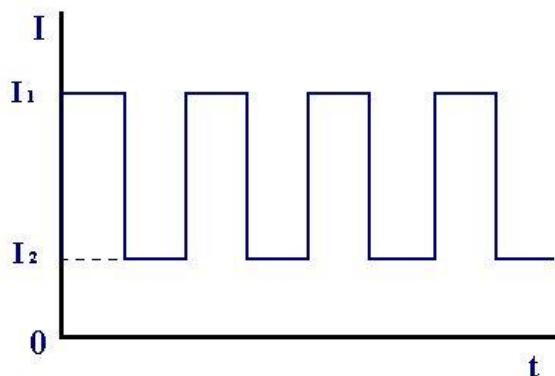


Obr. 19 Rozdíl mezi svary zhotovenými pulsním svařováním a bez pulzu. [49]

Na obrázku 20 je časová závislost pulsního proudu. Horní hodnota proudu I_1 je nastavena manuálně a zprostředkovává nastavení svarové lázně a přídavného materiálu. Na základě doby pulsu a amplitudy impulsního proudu dochází k regulaci velikosti svarové lázně. Tím je docíleno velmi dobré kontroly svařovacího procesu.

Základní proud I_2 se podle velikosti impulsního proudu I_1 nastaví manuálně nebo automaticky. Většinou je hodnota základního proudu zhruba 20 a 50 % amplitudy pulsního proudu. Základní proud řídí ionizaci svarové lázně. Prodloužením doby hoření oblouku lze oddálit tuhnutí svarové lázně, což má vliv na výsledný vzhled svaru.

Díky impulsnímu TIG svařování lze vyrobit tzv. penízkový svar. Překrytí 50 až 70% vytvoří estetický svar. Názornou ukázkou penízkového svaru lze vidět na obrázku 21. Tímto způsobem lze dosáhnout malé tepelně ovlivněné oblasti a minimálního mísení materiálů.



Obr. 20 Průběh pulsního proudu. [49]



Obr. 21 Ukázka penízkové svaru. [43]

2.2.3 Čistící efekt [45], [47], [48], [49]

Ve prospěch používání TIG svařování hliníku, hořčíku anebo hořčíku svědčí fakt, že tato technika umožňuje tzv. čistící efekt. Výše zmíněné kovy a jejich slitiny mají tendenci ke snadné oxidaci. Vrstva oxidu ztěžuje metalurgické spojení, jelikož má značně rozdílnou teplotu tavení. Tavení oxidu hlinitého probíhá až za teploty 2050°C, zatímco Al se taví při teplotě 580-660°C. Vměstky oxidů zhoršují mechanické vlastnosti a mají neblahý vliv na kvalitu svaru. Jejich odstranění tedy vede ke zvýšení svarové kvality a zlepšení mechanických vlastností svaru.

Existuje několik možností, jak odstranit oxid hlinitý jako například: chemicky, mechanicky anebo elektrickým obloukem. Neprodleně před svařením lze provést mechanické čištění broušením nebo kartáčováním. Tyto procesy nejsou tolik účinné a navíc je nutné, provádět tyto výrobní postupy těsně před svařováním. Během chemického čištění se používají speciální pasty a rozpouštědla. Nejlepších výsledků bylo dosaženo elektrickým obloukem během nepřímého zapojení při svařování metodou TIG za použití argonu. Při nepřímém zapojení směřují kationty z netavící se elektrody na zoxidovaný povrch a svou kinetickou energií narušují oxidační vrstvu.

Závěrem této kapitoly by bylo vhodné shrnout výhody a nevýhody, které TIG svařování přináší. Mezi výhody se řadí:

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

Nevýhody této metody představují:

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

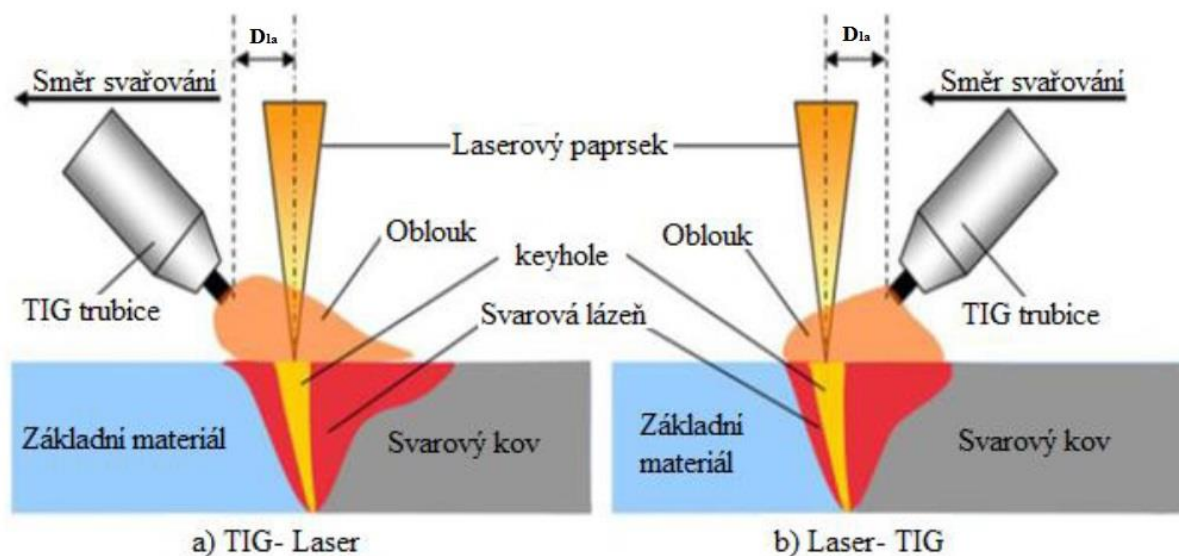
2.3 Hybridní svařování Laser-TIG [51] [52], [53]

Na přelomu 70-80. let minulého století se zrodil koncept hybridního svařování. Avšak nebyly dostatečné teoretické základy pro rozvoj samotného laserového svařování, výzkum tehdy byl velice finančně náročný. Proto realizace konceptu byla uskutečněna až v posledních letech 21. stol, kdy náklady na výzkum rapidně poklesly. Jak název napovídá, jedná se o spojení dvou svařovacích metod: svařování laserem a TIG-oblouková svařovací metoda netavící se wolframovou elektrodou. V současné době je použití hybridní technologie na vzestupu a nachází častější uplatnění v běžné praxi.

Kombinací výše zmíněných metod získáváme nové možnosti aplikací v oblasti svařování. Z ekonomického hlediska se pořizovací náklady na hybridní svařovací aparaturu liší pouze minimálně, oproti samotné laserové stanici. Díky tomuto faktu, je zařazení hybridní technologie do běžné praxe velmi reálné. Technologie kompenzuje nevýhody jednotlivých metod a zároveň si ponechává přednosti laserového svazku.

Vzhledem k požitému laserovému zdroji, lze technologii rozdělit na více modifikací. Z důvodu dobré absorpce je nejčastěji používán pevnolátkový laser. Díky vysoké plošné energetické hustotě je laserový svazek používán jako primární zdroj tepla, který zajišťuje hlavní funkce svařovacího procesu – hloubku průvaru. Sekundárním zdrojem tepla je tedy el. oblouk, jenž zajišťuje doplňkové funkce, které napomáhají stabilitě, efektivitě a spolehlivosti svařovacího procesu.

Základní konfigurace laser-TIG je používána ve dvou provedení, které se liší v pozici TIG hlavičky vůči laserovému paprsku (vzhledem k posuvové rychlosti). Uspořádání hybridní laserové soustavy je vyobrazeno na obrázku 22.



Obr. 22 Uspořádání hybridní soustavy a) TIG předehřev b) TIG dohřev. [53]

V případě, kde TIG hlavička předchází laserový svazek (obr. 22a), dochází vlivem obloukového předehřevu k tzv. čistícímu efektu. Díky tomuto efektu je významně odstraňována oxidová vrstva, která brání metalurgickému spojení a následně zapříčiňuje tvorbu vměstků ve svarové lázni. Z tohoto důvodu je první uspořádání používané zejména na slitiny hliníku, kde je odstranění oxidové vrstvy velmi nezbytné. Opačné uspořádání (TIG dohřev) dosahujeme mírného poklesu hodnot hloubky průvaru, z důvodu menší absorpce laserového paprsku.

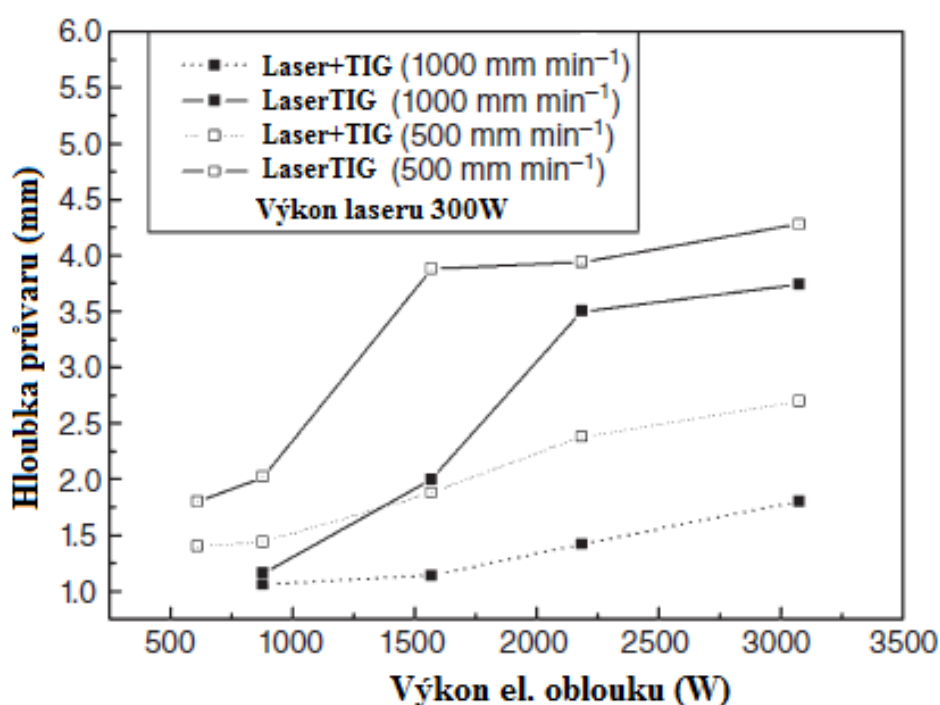
2.3.1 Procesní parametry [51] [52], [53]

Množství procesních parametrů je dáno součtem parametrů obou svařovacích metod. Který je navíc navýšen o parametry vztahující se k vzájemné pozici zdrojů tepla vůči sobě, nebo vůči povrchu svařovaného materiálu. Nejprve popíšeme procesní parametry jednotlivých metod a následně se zaměříme na výše zmiňované a to konkrétně: úhel odklonu laseru od normály, TIGu od normály; vzdálenost elektrody od laserového svazku a vzdálenost elektrody od povrchu.

S rostoucím počtem procesních parametrů neodmyslitelně souvisí komplikovanost nastavení optimálního svařovacího procesu. Proto je nutné postupovat krokově, zvolit si pouze jeden parametr který bude proměnný a ostatní parametry zůstanou fixní. Díky tomuto postupu, můžeme snadno detekovat účinky jednotlivých parametrů na svařovací proces. Avšak na úkor složitosti nastavení, přináší vysoký počet parametrů mnohé výhody. Tvar výsledného svaru může být modifikován dle potřeby, což významně rozšiřuje oblast použití této technologie.

- Výkon laseru a velikost proudu el. oblouku

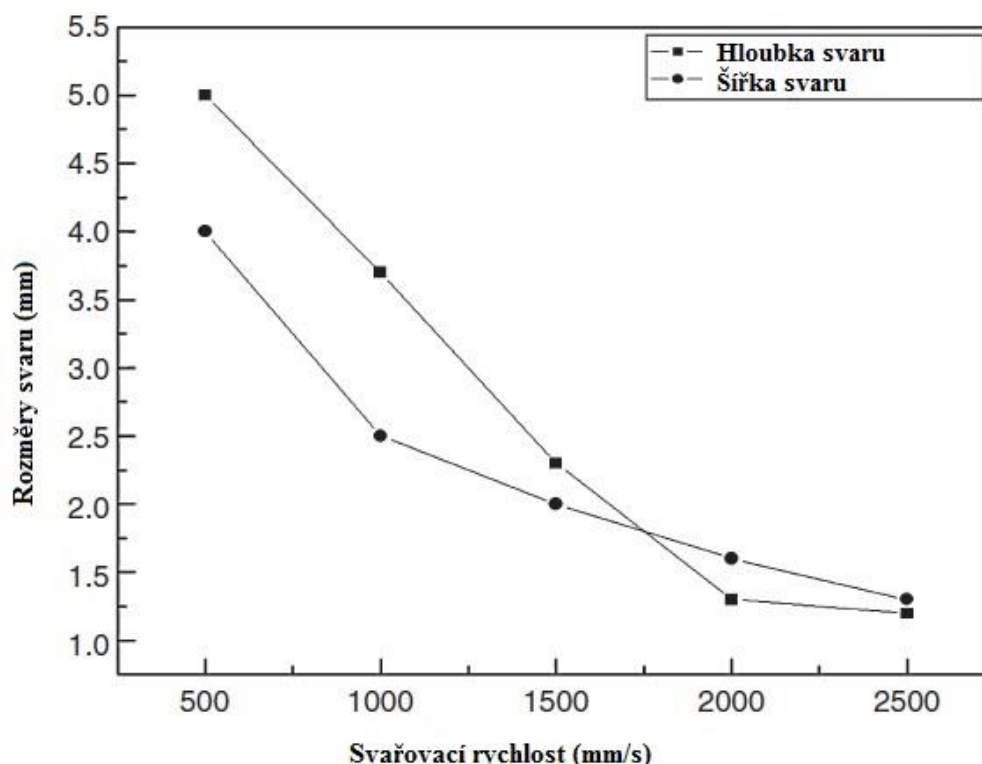
Nejvýznamnější procesní parametry jednotlivých metod-výkon laseru a velikost proudu jsou společně promítnuty do závislosti na hloubce průvaru. Rozměry svarové lázně jsou ovlivněny vneseným teplem, které je závislé na výkonu laseru a el. oblouku. Se zvětšujícím se výkonem rostou i rozměry svarové lázně. Metoda hybridního svařování laser-TIG se vyznačuje větší hloubkou průvaru, než když jsou jednotlivé metody provedeny zvlášť. Což potvrzuje závislost výkonu el. oblouku na hloubce průvaru na obrázku 23.



Obr. 23 Závislost výkonu el. oblouku na hloubce průvaru. [52]

- Posuvová rychlost

Neboli svařovací rychlost, je nejdůležitějším procesním parametrem, který se významně podílí na výsledné ekonomice svařovacího procesu. Z tohoto důvodu se v praxi zachovává konstantní posuvová rychlost a upravují se ostatní svařovací parametry, které nemají na výslednou ekonomiku takový vliv. Hodnota posuvové rychlosti má vliv na výsledné rozměry svaru. Na obrázku 24 je vyobrazena závislost rozměrů svaru na svařovací rychlosti. Jak je z grafu patrné, se zvětšující se hodnotou posuvové rychlosti klesají hodnoty rozměrů svarů. Zapříčiňuje to množství vneseného tepla, které klesá se zvyšující se rychlostí.

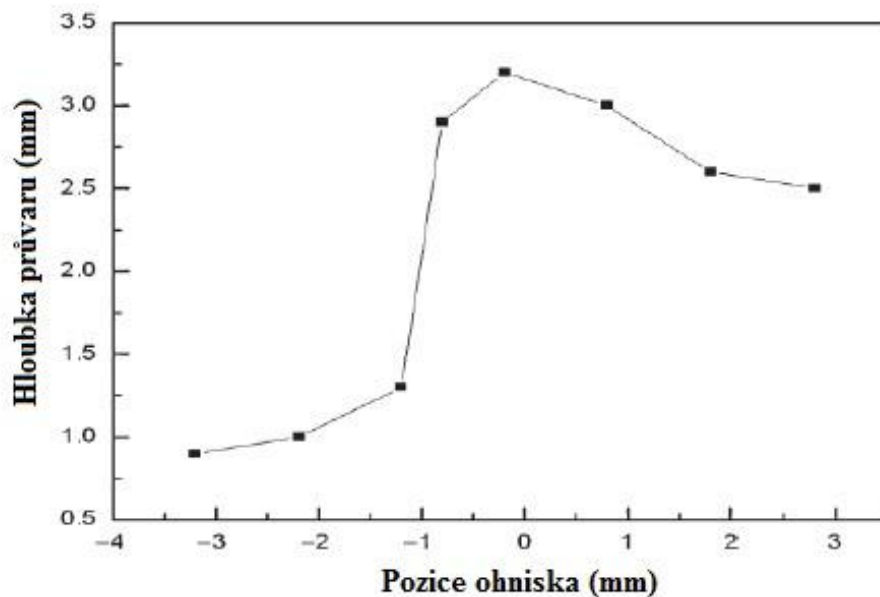


Obr. 24 Závislost svařovací rychlosti na rozměrech svaru. [53]

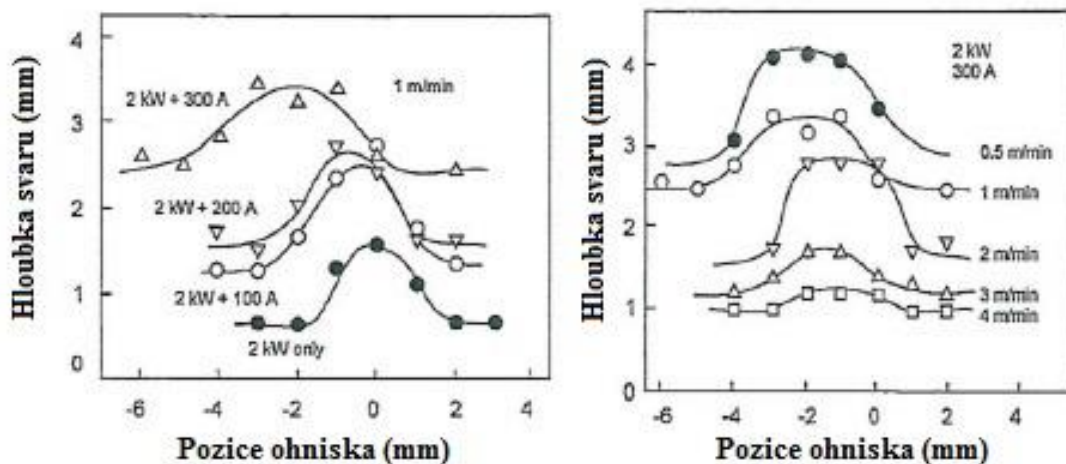
- Poloha ohniska vzhledem k povrchu

Zaostřování laserového svazku je jeden z dalších procesních parametrů, který významně ovlivňuje hloubku průvaru. Je to dáno důsledkem změny hustoty výkonu laserového svazku. Ve srovnání samotné metody laserového svařování a hybridní laser-TIG se poloha ohniska vzhledem k povrchu nepatrně odlišují. Dynamika obloukového tlaku zapříčiňuje mírnou konkávnost povrchu svarové lázně, která posouvá polohu ohniska mírně pod povrch svařovaného materiálu. Závislost polohy ohniska na hloubce průvaru je vyobrazena na obrázku 25. Nejvyšší hodnotu hloubky průvaru nabývá v poloze ohniska 0,2mm pod povrchem.

Rozměr a tvar svarové lázně je ovlivněn vneseným teplem, které závisí zejména na výkonu laseru, svařovacího proudu a také svařovací rychlosti. Poloha ohniska je tedy ovlivněna těmito procesními parametry. Na obrázku 26 jsou vyobrazeny závislosti hloubky svaru na pozici ohniska s ohledem na svařovací rychlost. Jak již bylo zmíněno výše, se snižující posuvovou rychlostí vzrůstá hloubka průvaru, která nejvyšší hodnoty nabývá mírně pod povrchem svařovaného materiálu.



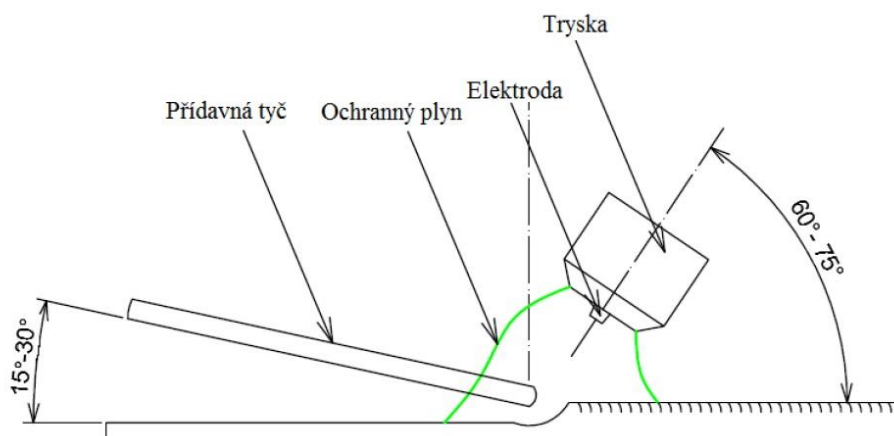
Obr. 25 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru. [53]



Obr. 26 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru s konstantním a) proudem b) rychlostí. [53]

- Úhel odklonu TIGu od normály

Pro docílení stabilního procesu metody TIG je nutné dodržení pracovních úhlu hořáku a přídavného materiálu. U metody ručního svařování je správné nastavení dodržováno svařecím technikem. Hodnoty pracovních úhlu jsou závislé na ostatních procesních parametrech a zejména na svařovaném materiálu. Intervaly hodnot jsou schematicky znázorněny na obrázku 27, kde jsou vztaženy k základnímu materiálu. Hybridní technologie svařování laser-TIG je bez přídavného materiálu, tudíž je nastavován pouze úhel odklonu hořáku. Jelikož další pracovní úhel (odklon laseru) je vztažen vůči normále, tak je z praktických důvodů úhel odklonu hořáku vztažen taktéž. Hodnota úhlu je nastavována v intervalu od 30° až 45°.



Obr. 27 Schématické znázornění pracovních úhlu během metody TIG. [53]

- Úhel odklonu laseru od normály

Z hlediska bezpečnosti práce, nesmíme opomínat nastavení úhlu odklonu laseru od normály. Z důvodu odrazivosti svařovaného materiálu dochází k odrazu laserového svazku a rozstříku nataveného materiálu. Správné nastavení úhlu zabrání poškození laserové hlavičky a případnému zranění obsluhy. V závislosti na zvyšujícím se koeficientu odrazu svařovaného materiálu se zvětšuje hodnota úhlu odklonu laseru od normály. Na základě hodnot koeficientu je pro hliníkové slitiny doporučena hodnota úhlu 6°.

- Vzdálenost elektrody od laserového svazku

Na interakci laserového paprsku a el. oblouku má významný vliv vzdálenost elektrody od laserového svazku D_{LA} , která je vyobrazena na obrázku 22. Má podstatný účinek na výslednou hloubku průvaru, která se s poklesem hodnoty D_{LA} narůstá. Avšak při velmi nízké hodnotě D_{LA} může dojít k postupnému odtavování elektrody laserovým svazkem, což způsobuje ztrátu stability svařovacího procesu a následnou eventualitu k vzniku svarových vad. Na úkor důležitosti tohoto parametru, nebyly dosud provedeny rozsáhlejší výzkumy D_{LA} u hliníkových slitin. Na základě bakalářské práce, můžeme přepokládat optimální hodnotu $D_{LA}=3\text{mm}$.

- Vzdálenost elektrody od povrchu

Vzhledem k udržování konstantní vzdálenosti elektrody od svařovaného povrchu, odpadá nutnost invertoru vyrovnávat proudové změny vzniklé nestálým odstupem elektrody. Doporučená vzdálenost elektrody výrobcem je rovna průměru elektrody, např. elektroda o průměru $\varnothing 2,4$ je rovna vzdálenosti 2,4mm od povrchu. Nastavení příliš vysoké hodnoty vzdálenosti může vést k nestabilitě svařovacího procesu vlivem neuzavření el. oblouku. V opačném případě, vzdálenost příliš malá, můžeme přepokládat nehomogenitu svaru.

2.3.2 Technologické parametry [52], [53]

Hybridní svařování laser-TIG se vyznačuje vysokou svařovací rychlostí a stabilitou procesu, zejména u hliníkových slitin, kde rapidně snižuje pórovitost svaru. To je zapříčiněno použitím obloukového přehřevu TIG, jenž zvyšuje vnesené teplo, které prodlužuje dobu tuhnutí svarové lázně. V důsledku je snížena pravděpodobnost výskytu nerozpuštěného vodíku v tuhém roztoku, který způsobuje nežádoucí pórovitost svaru.

Výhody:

- Vysoká stabilita svařovacího procesu
- Vysoká svařovací rychlost
- Malá tepelně ovlivněná oblast
- Účinnost je rapidně vyšší jak u každé metody zvlášť
- Čistící efekt – odstranění oxidové vrstvy
- Široké spektrum použití v závislosti na počtu procesních parametrů
- Svařování bez přídavného materiálu

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací náklady
- Obtížné nastavení optimálního svařovacího procesu

2.4 Svařitelnost hliníkových slitin [6], [54], [55]

Kvalita svarového spoje značně ovlivňuje mechanické vlastnosti svařovaných dílů a negativně působí na jejich životnost. Na kvalitu svarového spoje působí nejen použitá metoda svařování a typ svařovaného materiálu, ale i míra změny struktury a chemických vlastností materiálu v tepelně ovlivněné zóně svaru. Co se změn struktury a chemických vlastností týče, musíme rozlišit mezi vytvrditelnými a nevytvrditelnými hliníkovými slitinami. Zatímco u nevytvrditelných hliníkových slitin se nemusí dbát zvýšené opatrnosti, vytvrditelné slitiny je nutné svařovat ve stavu nevytvrzeném. Pokud by byl materiál svařen ve stavu vytvrzeném, nebyla by zaručena jeho homogenita po svaření, a proto se vytvrditelné slitiny svařují před vytvrzením. Je nutné počítat s tím, že svar má horší mechanické a únavové vlastnosti než okolní materiál.

Hliník vykazuje vysokou afinitu ke kyslíku a vrstva v podobě jejich sloučeniny Al_2O_3 znesnadňuje další metalurgické procesy. Teplota tavení tohoto oxidu je třikrát vyšší než teplota tavení samotného hliníku. Tvorba nevodivé vrstvy tedy znamená největší obtíž při svařování hliníku. Pomine-li se tento fakt, lze konstatovat, že svařitelnost hliníkových slitin je dobrá. Existuje řada technologických metod, jak je možné hliníkové slitiny svařovat a to například: plamen, elektrický oblouk, laserový svazek, elektronový paprsek a plazma. Také existuje řada metod, jak vrstvu oxidu hlinitého odstranit. Další úskalí představuje vysoká tepelná vodivost hliníku.

2.4.1 Svarové vady [54], [55]

Existuje celá řada postupů, jak detekovat svarové vady. Nejjednodušší a prvotní metodou je vizuální kontrola. Používá se však i daleko složitějších přístupů, jako například penetrační či ultrazvuková metoda. Dále se svarové spoje kontrolují RTG prozářením či pozorováním mikroskopem. Vady jsou hodnoceny dle normy ČSN na přípustné, nepřípustné a dále na opravitelné a neopravitelné. Přípustné vady jsou takové, které splňují předepsané normy či smluvní podmínky. Naopak nepřípustné vady těmto požadavkům neodpovídají a podle dalšího postupu se dělí na opravitelné a neopravitelné. Je zřejmé, že nejzávažnějším případem jsou vady neopravitelné. Součást obsahující tento druh vad nesmí být použita. Svarové defekty je možné dělit dle jejich tvaru a polohy. Obrázek 28 znázorňuje tento způsob dělení vad.



Obr.28 Typy vad ve svarech. [55]

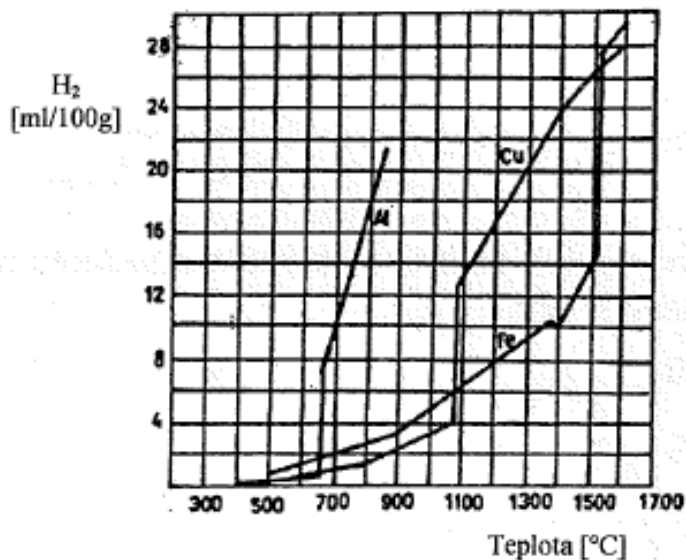
Dle tvaru vady se rozlišují prostorové, plošné a bodové defekty. Mezi bodové defekty se řadí mikropóry či kulovité vměstky. Trhliny, neprůvody nebo studené spoje charakterizují plošné vady. Staženiny, bubliny, a vměstky se vyskytují u vad prostorových. Dle umístění vad se defekty dělí na vnitřní a povrchové.

Výskyt svarových vad je závislý na použité svařovací metodě a svařovaném materiálu. Jak bylo zmíněno výše, svařování slitin hliníku je obtížné kvůli přítomnosti oxidové vrstvy na povrchu, která zapříčiňuje pórovitost svaru. Další typickou vadou jsou horké trhliny.

- Pórovitost svaru

Oxidy hliníky je vysoce hydrofilní a tím pádem váže vodu, která představuje zdroj vodíku v materiálu. Rozpustnost vodíku ve slitině se mění přes teplotní rozsah a vodík je rozpustný pouze v tavenině. Závislost rozpustnosti vodíku na změně teploty je vyobrazena na obrázku 29. Jelikož hliník disponuje vysokou teplotní vodivostí, svar během svařování rychle chladne a vodík přítomný v materiálu nestihne difundovat pryč. Po překročení křivky solidu dochází ke vzniku pórů a bublin.

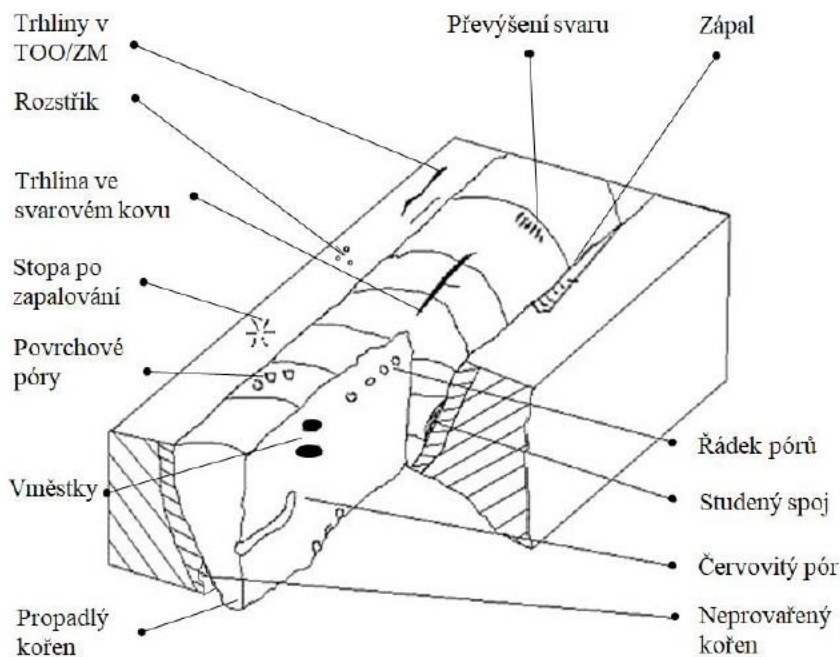
Pórovitost během laserového svařování je způsobena dynamikou keyhole a kmitáním svarové lázně. V okamžiku, kdy dojde ke zaškrcení spodní části, dochází ke vzniku bubliny, která prostupuje vzhůru svarovým kovem. Použitím předeřevu, dojde k prodloužení času tuhnutí svarového kovu, tím pádem vzniklé bubliny mají dostatek času na únik ze svarové lázně.



Obr. 29 Rozpustnost vodíku v hliníku. [54]

- Horké trhliny

Během svařování se mohou trhliny za horka objevit jak ve svaru samotném, tak i v tepelně ovlivněném okolí. Horké trhliny se z pravidla dělí na krystalizační, likvidační a na trhliny z poklesu tažnosti. Krystalizační trhliny vznikají, je-li neúplně zaplněn prostor mezi rostoucími dendrity. Likvidační trhliny jsou zapříčiněny lokálním natavením eutektických fází v teplotách pod křivkou solidu. Poslední typ trhlín vzniká v důsledku zbytkových napjatostí v materiálu. Vznik horkých trhlín lze zamezit různými technologickými procesy jako například: předeřevem, vysokou svařovací rychlostí a volbou vhodné technologie.



Obr. 30 Svarové vady [56]

2.5 Mechanické zkoušky svarových spojů [57], [58], [59], [60], [61], [62]

Naprostou nutností při vývoji nové součásti je zaručit spolehlivý, a především bezpečný provoz. Proto je nezbytné znát mechanické vlastnosti, díky kterým lze určit, jestli součást vyhovuje nebo nikoliv. K tomuto vyhodnocení nám slouží normalizované zkoušky materiálu, které lze rozdělit podle jejich přístupu na nedestruktivní (NDT) a destruktivní (DT). V případě nedestruktivní zkoušky nedochází k jakémukoliv porušení celistvosti zkoušené součásti, a měření probíhá na základě změn fyzikálních veličin. Avšak na úkor zachování funkčnosti, je potřeba k provádění zkoušky proškolená obsluha a častá kalibrace měřícího zařízení. V opačném případě, u destruktivní zkoušky dochází k preparaci vzorků ze zkoušené součásti a následné zkoumání. Využívá se zejména pro součásti určené k sériové výrobě.

Nedestruktivní zkoušky:

- Vizuální metoda
- Magneticko-prášková metoda (obr. 31)
- Kapilární metoda
- Zkouška ultrazvukem
- Zkouška rentgenovým zářením

Destruktivní zkoušky:

- Tahová zkouška
- Zkoušky tvrdosti
- Zkouška makro a mikrostruktury
- Zkouška ohybem
- Zkouška rázem v ohybu



Obr. 31 Magnetická zkouška svaru [59]

2.5.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Jedna z nejpoužívanějších statických metod měření tvrdosti je metoda dle Vickerse, kterou popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1. Metodika měření spočívá ve vtlačování přesně definovaného indentoru a následnému měření rozměrů vzniklého vtisku. Vtlačovaný indentor je pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který tvoří čtvercový vtisk (obr. 32). Na něm jsou měřeny dvě na sebe kolmé úhlopříčky, z kterých se dle vzorce (2.1) vypočítá výsledná hodnota tvrdosti. Povrch zkoušeného materiálu musí být hladký, rovný, bez okujů a mazadel. Doporučuje se příprava povrchu leštěním, popřípadě elektrolytické leštění. Je možné zkoušku provádět na zakřivených plochách, kovexních i konkávních, avšak je nutné použít korekci. Zatížení musí probíhat kolmo k měřenému povrchu definovanou silou po určitou dobu. Dle hodnoty zatížení můžeme zkoušku rozdělit na tři oblasti: zkouška tvrdosti dle Vickerse – 5 až 100kg; zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkem zatížení – 0,2 až 5kg; zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse – 0,01 až 0,2kg. Velikost zatížení musí být voleno s ohledem na vzniklý vtisk. Velikost úhlopříčky musí patřit do intervalu $0,02 - 1,40\mu\text{m}$ a zároveň rozdíl mezi jednotlivými délkami úhlopříček nesmí přesáhnout 5%. Standartně se doba zatížení volí v intervalu 10 - 15s, avšak může být i větší. Pracovní teplota zkoušky se pohybuje v rozmezí 10°C až 35°C , pokud jsou předepsány řízené podmínky je teplotní interval omezen na $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

Výsledná naměřená tvrdost je bezrozměrná a je vyjádřena ve stupnici HV, např. HV5 se rovná zatížení 5kg. Její velikost závisí na poměru zatěžovací síly a velikosti plochy vtisku, snadno ji vypočítáme z následující rovnice:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} [-]$$

kde: F – zatěžovací síla [N]

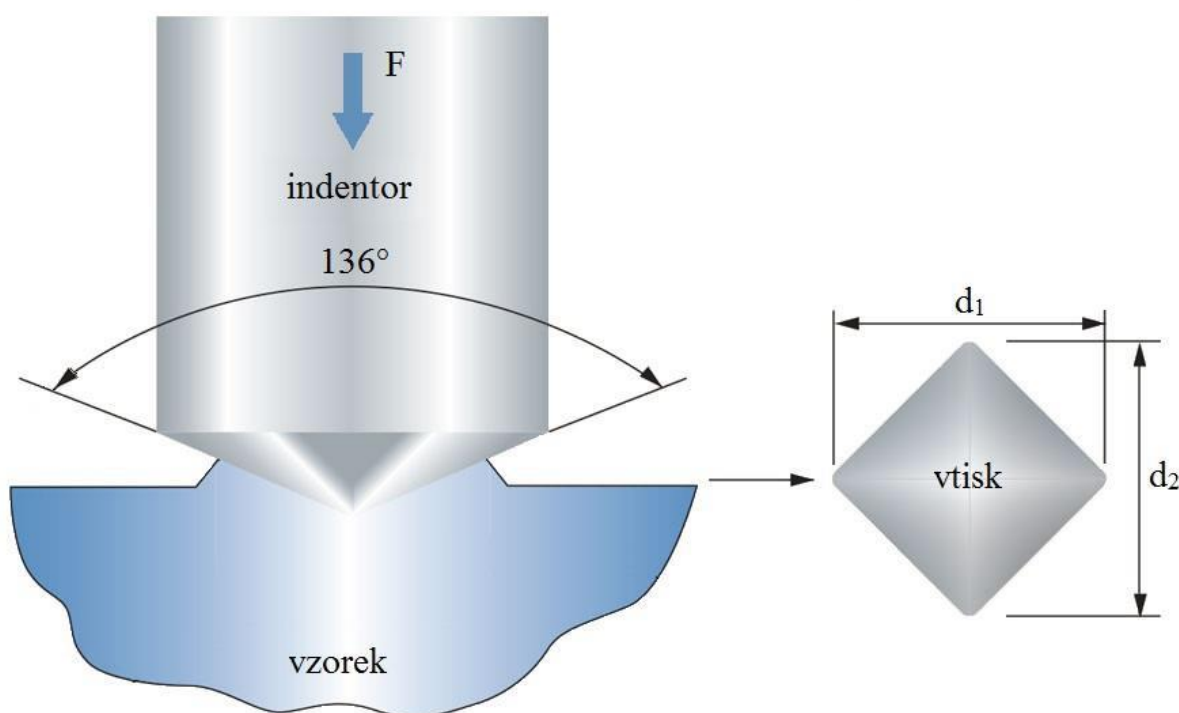
d – délka úhlopříčky vtisku [μm]

- Délku úhlopříčky vtisku lze vypočítat následovně:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} [\mu\text{m}]$$

kde: d_1 – délka vtisku první úhlopříčky [μm]

d_2 – délka vtisku druhé úhlopříčky [μm]



Obr. 32 Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse. [60]

Pro měření délek úhlopříček je možné použít konvenční mikroskopy, avšak velkou výhodou je použití digitálních, které jsou propojeny s počítačem. Umožňují promítání obrazu na obrazovku, kde jednoduše změříme úhlopříčky a software daného tvrdoměru je vyhodnotí. Z důvodu eliminace chybného odečtení hodnot je dle normy stanoveno zvětšení obrazu, kde musí hodnota úhlopříčky zabírat 25-75% zorného pole. Pro usnadnění měření na konvenčních mikroskopech, se využívají přepočtové tabulky, kde na základě zatěžující síly a délky úhlopříček je stanovena hodnota tvrdosti.

2.5.2 Zkouška tahem [60], [61]

Zkouška tahem je nejužívanější statická mechanická zkouška, která slouží k určení pevnostních a deformačních charakteristik. Charakterizuje ji norma ČSN EN ISO 6892-1. Spočívá v plynulém vzrůstajícím tahovém namáhání zkušební tělesa až do mezního stavu, kde dojde k jeho porušení. Během zkoušky jsou zaznamenávány hodnoty prodloužení zkušební tělesa v závislosti na velikosti zátěžné síly.

Zkušební tělesa ve tvaru tyčí (obr. 33), válcové nebo ploché, jsou upínány do zkušebního trhačího stroje, tak aby osa zkušební tyče byla totožná s osou upínacích čelistí. Před započítáním experimentu musí být na vzorkách poznačena měrná délka L_0 , z které je posléze měřeno prodloužení tyče. Dle normy, jsou v závislosti na zkoušeném materiálu stanoveny dva typy tyčí – dlouhé a krátké. Z hlediska úspory materiálu jsou většinou používány krátké tyče. Měrnou délku lze vypočítat pomocí vzorce 2.3 kde koeficient je volen dle rozměru tyče – krátké ploché $k=5,65$; dlouhé ploché $k=11,3$. Zkouška musí probíhat za předem definovaných podmínek, tlaku a zejména teploty, které mají významný vliv na výsledné vyhodnocení. Před samotnou realizací se na základě materiálového modelu určí zatěžovací rychlost, kterou bude síla vyvíjena na zkušební tyč. Výsledkem tahové zkoušky je závislost zatěžovací síly na prodloužení vzorku, tzv. tahový diagram. Z kterého lze snadno určit následující materiálové charakteristiky:

- Výpočet měrné délky zkušební tyče

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \text{ [mm]}$$

kde: k – rozměrový koeficient [-]

S_0 – průřez zkušební tyče [mm^2]

- Poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \text{ [-]}$$

kde: L – prodloužená měrná délka zkušební tyče [mm]

L_0 – měrná délka zkušební tyče [mm]

- Hookův zákon

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]}$$

kde: E – modul pružnosti v tahu [MPa]

- Mez kluzu

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]}$$

kde: F_e – zatěžovací síla na mezi kluzu [N]

S_0 – počáteční průřez tyče [mm^2]

- Smluvní mez kluzu

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]}$$

kde: $F_{p0,2}$ – smluvní zatěžovací síla [N]

- Mez pevnosti

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]}$$

kde: F_m – zatěžovací síla na mezi pevnosti [N]

- Kontrakce (zúžení)

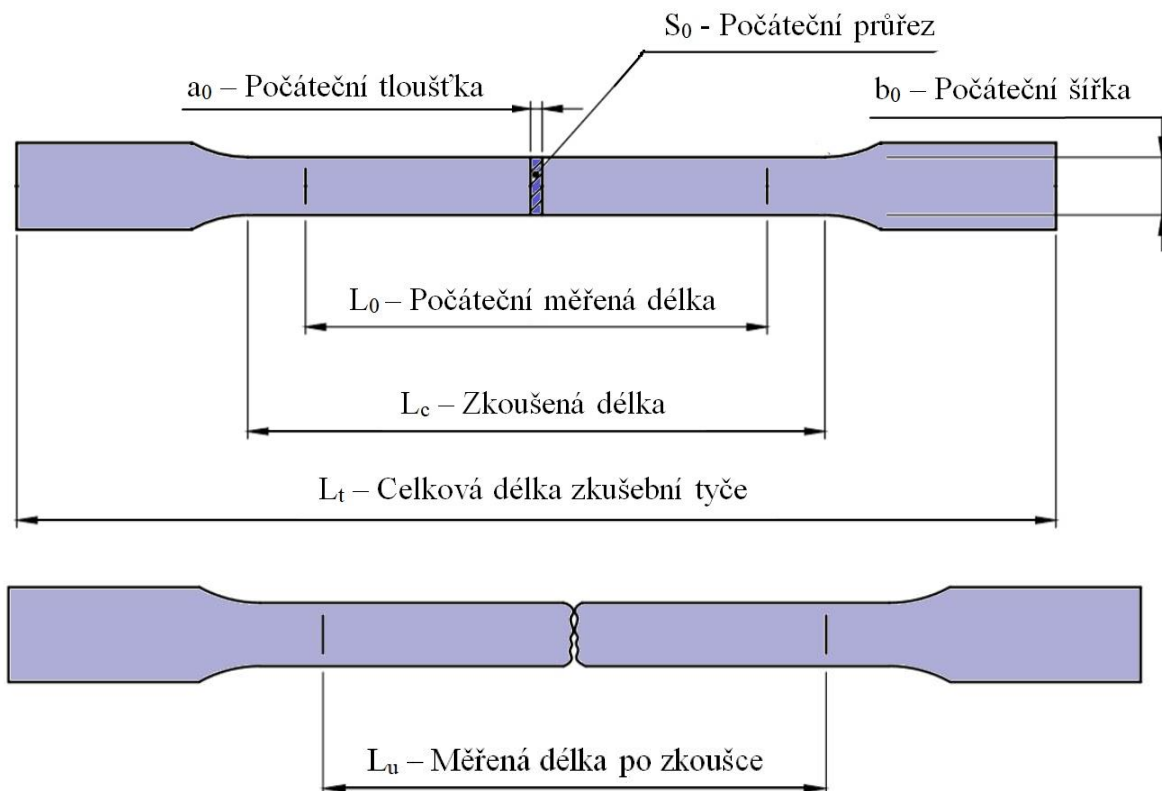
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

kde: S_0 – konečný průřez zkušební tyče [mm³]

- Tažnost

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

kde: L_u – měrná délka zkušební tyče po přetržení [mm]



Obr. 33 Plochá zkušební tyč[60]

3 EXPERIMENT

Experimentální část se zabývá optimalizací procesních parametrů homogenního hybridního svařování laser-TIG na slitinách hliníku, a to konkrétně: EN AW-5754 H22, EN AW 6082 T6. Nejprve je proveden materiálový rozbor obou slitin, který zahrnuje chemické složení, mechanické vlastnosti a použití. Následně je podrobně popsán proces vyhotovení zkušebních svarů, včetně použité svařovací aparatury a procesních parametrů. Zkušební vzorky jsou podrobeny vizuální analýze makrostruktury i mikrostruktury, která je doplněna výpočtovou částí vneseného tepla. Na závěr jsou zkoumány mechanické vlastnosti vzorků, pomocí zkoušek mikro-tvrdomosti podle Vickerse a tahové zkoušky.

3.1 Materiálový rozbor

V rámci experimentu byly použity plechy dvou slitin hliníku pro tváření o tloušťce 3 mm. Použité slitiny jsou z odlišných řad, tudíž se liší dle hlavních slitinových prvků a eventuality precipitačního vytvrzení – řada 5000 (AlMg) nevytvrditelná, řada 6000 (AlMgSi) vytvrditelná.

- EN AW-5754 H22

Slitiny hliníku řady 5000 stejně jako nelegovaný hliník nelze tepelně vytvrdit. Tvářením za studena můžeme dosáhnout relativně vysokého stupně pevnosti, na úkor snížení stupně tvařitelnosti. Odolnost proti korozi v atmosférických podmínkách je stejně dobrá jako v mořském prostředí. Svařitelnost této slitiny je klasifikována jako dobře svařitelná konvenčními svařovacími metodami používanými pro hliník. Za určitých podmínek lze slitinu tepelně zpracovat pomocí žhání na měkko. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách níže (Tab. 4 a Tab. 5) a také v atestu obsaženém v příloze (příloha č.1).

Tab. 4 Chemické složení EN AW-5754 H22

Chemické složení EN AW-5754 H22									
Chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mn+Cr	Mg	Cr	Zn	Ti
Maximální hodnoty [%hm]	0,40	0,40	0,10	0,50	0,60	3,60	0,30	0,20	0,15
Skutečné hodnoty [%hm]	0,26	0,37	0,05	0,26	0,31	2,90	0,05	0,05	0,03

Tab. 5 Mechanické vlastnosti EN AW-5754 H22

Mechanické vlastnosti EN AW-5754 H22	
Mez pevnosti [MPa]	235
Mez kluzu [MPa]	182
Tažnosti [%]	13,5

- EN AW-6082 T6

Precipitačně vytvrditelná slitina hliníku řady 6000, má široké využití u výrobků, kde je kladen důraz na kombinaci pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi. Nejčastěji je materiál dodáván již ve vytvrzeném stavu od výrobce. Vyznačuje se výbornou odolností proti korozi v atmosférických podmínkách i v mořském prostředí. Odolnost lze zlepšit pomocí anodické oxidace výrobků. Jako u předešlé slitiny, lze slitinu klasifikovat jako dobře svařitelnou konvenčními svařovacími metodami používanými pro hliník. Nutno pamatovat na snížení pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti po svařování. Patříčným tepelným zpracováním (rozpuštěcí žíhání a vytvrzení) lze docílit původní pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách níže (Tab. 6 a Tab. 7) a také v atestu obsaženém v příloze (příloha č.2).

Tab. 6 Chemické složení EN AW-6082 T6

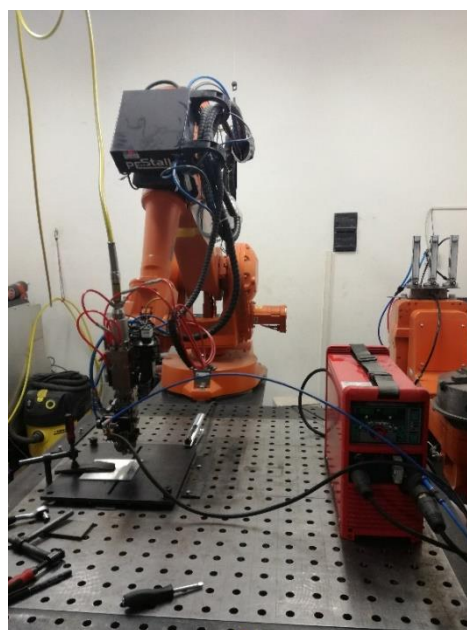
Chemické složení EN AW-6082 T6								
Chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Maximální hodnoty [%hm]	1,30	0,50	0,10	0,10	1,20	0,25	0,20	0,10
Skutečné hodnoty [%hm]	0,90	0,37	0,07	0,42	0,80	0,02	0,08	0,02

Tab. 7 Mechanické vlastnosti EN AW-6082 T6

Mechanické vlastnosti EN AW-6082 T6	
Mez pevnosti [MPa]	343-345
Mez kluzu [MPa]	294-296
Tažnosti [%]	14-16

3.2 Vyhotovení zkušebních svarů

Vstupní materiál pro zkušební svary byl dodán od dvou dodavatelů. Konkrétně jde o Hydro Aluminium Rolled Products GmbH (dále pouze HARP) a Alcom Alval s.r.o. (dále pouze AA). Jak již bylo řečeno v materiálovém rozboru, vstupní materiál obou slitin byl o shodné tloušťce 3 mm, lišil se pouze typem dodávaného materiálu. Slitina EN AW-5754 H22 byla dodána ve formě svitku o šířce 1250 mm firmou HARP. Slitina EN AW-6082 T6 byla dodána firmou AA ve formě tabule plechu o rozměrech 2000x1000 mm. Ve firmě AQUAdem s.r.o, byly vyřezány zkušební vzorky pomocí laseru. Z důvodu snížení drsnosti řezu a očisty svarové hrany, byly styčné plochy zkušebních vzorků obroušeny pomocí brusného papíru o zrnitosti 180.



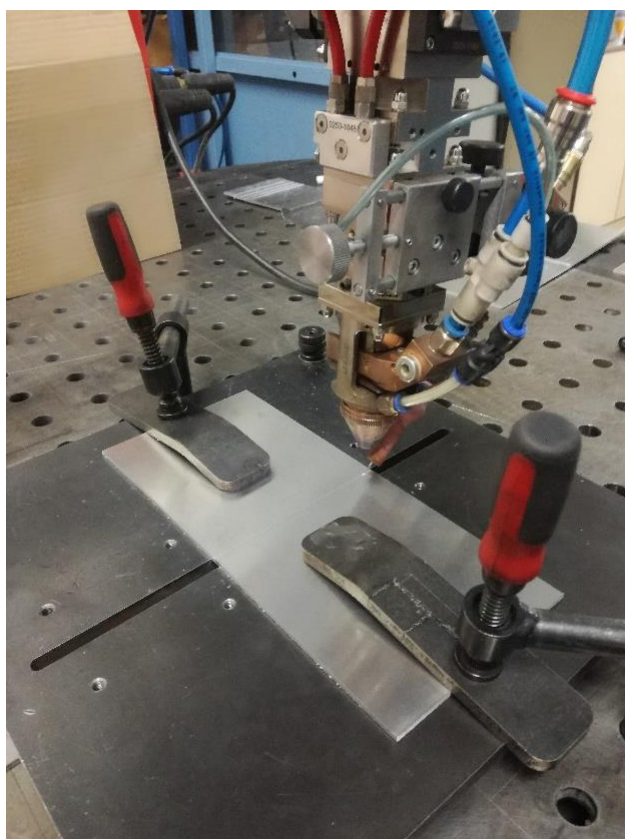
Obr. 34 Svařovací aparatura

Vyhotovení samotného experimentu bylo realizované na laserovém pracovišti na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR v Brně (dále pouze ÚPT), kde byla použita tato svařovací aparatura (obr. 34):

- Vlákenný výkonový laser IPG YLS-2000
 - výkon až 2000 W
 - vlnová délka 1070 nm
 - kontinuální a pulzní režim
- Svařovací hlava Precitec YW 30
- Manipulační robotické rameno ABB IRB 2400
 - šestiosá rotace
 - nosnost ramene 20 kg
 - pracovní rozsah 1550 mm
- Svařovací inventar Fronius Magic Wave 1700 Job
 - proudový rozsah 3 až 170 A
 - robustní konstrukce a jednoduchá koncepce ovládání

Tab. 8 Velikost předehřevu

Proměnné procesní parametry Laser-TIG		
Číslo vzorku	Proud [A]	Polarita elektrody
EN AW - 5754 H22		
1	0	-
2	20	AC
3	40	AC
4	60	AC
EN AW - 6082 T6		
5	0	-
6	20	AC
7	40	AC
8	60	AC



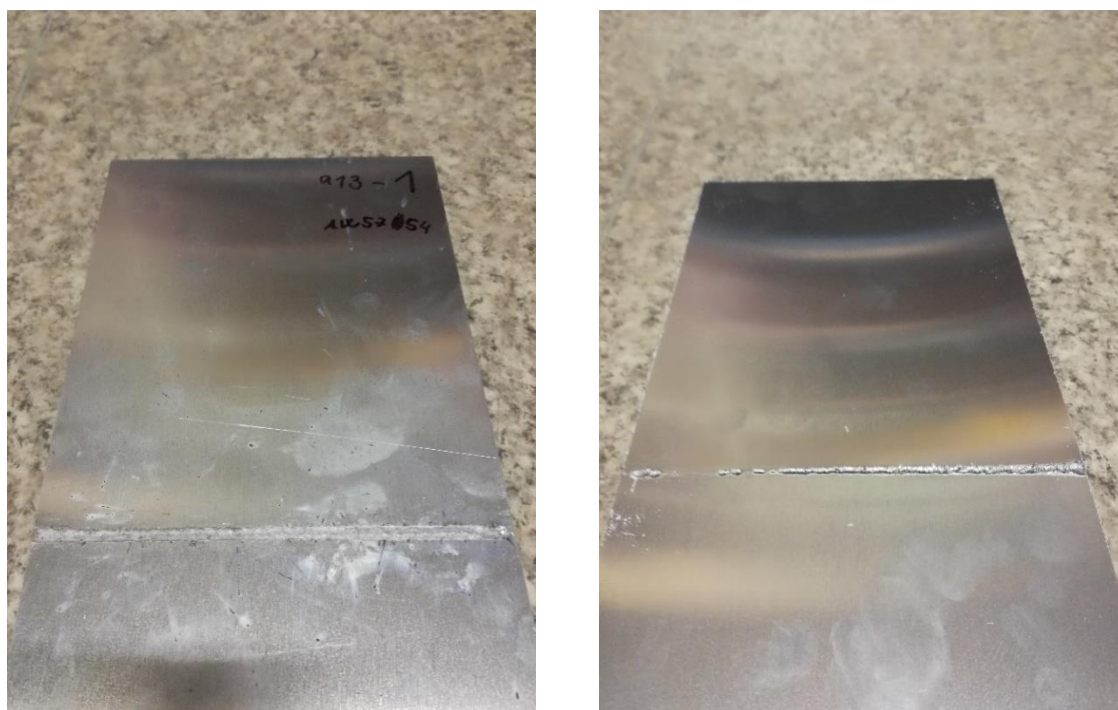
Obr. 35 Upnutí svařovaných vzorků

Samotná realizace svaření vzorků probíhala následovně. Nejprve byly dva vzorky ustanoveny styčnými plochami k sobě (bez mezery) do upínacího přípravku (viz. obr. 35). Následně proběhlo na vzdálenějším okraji svařovaných vzorků zbodování pomocí laseru, které zabráňovalo nechtěnému rozevírání svarové spáry vlivem tepelné roztažnosti. Pokud by byl tento aspekt zanedbán, mohlo by dojít k nerovnoměrnému nebo pouze k částečnému provaření vzorků. Následná realizace svaření pro ostatní vzorky probíhala dle stejného schématu za konstantních procesních parametrů (viz. tab. 9). První svar u obou materiálů (viz. č.1 a č.5) byl vyhotoven pouze pomocí laseru. U ostatních vzorků byl využit obloukový předehřev. Velikost předehřevu závisela na velikosti proudu, který měl pro každý svařovaný vzorek odlišné hodnoty (viz. tab. 8).

Tab. 9 Konstantní procesní parametry hybridního svařování laser-TIG

Konstantní procesní parametry hybridního svařování laser-TIG	
LASER	
Výkon laseru, P [W]	2000 W
Svařovací rychlost, v [mm·s ⁻¹]	20 mm·s ⁻¹
Ochranný plyn [-]	Argon 4,6
Průtok ochranného plynu laser Q _{vlas} [m ³ ·min ⁻¹]	15,5 m ³ ·min ⁻¹
Odklon laseru od normály γ _{las} [°]	6°
Poloha ohniska vzhledem k povrchu [mm]	0 mm (na povrchu)
TIG Obloukový předehřev	
Elektroda [-]	WT 20, ø2,4
Průtok ochranného plynu TIG Q _{vtig} [m ³ ·min ⁻¹]	15 - 16 m ³ ·min ⁻¹
Frekvence [Hz]	160 Hz
Střída [%]	50 %
Amplituda kladně pólované elektrody [%]	30 %
Průběh střídavého proudu [-]	obdelníkový
Odklon TIGu od normály γ _{tig} [°]	40°
Odstup TIGu před laserem [mm]	3 mm
Odstup TIGu nad povrchem [mm]	2 mm

Po dokončení svařovacího procesu u všech vzorků, byla provedena prvotní vizuální kontrola vyhotovených svarů. Z té byla patrná rostoucí závislost velikosti proudu předehřevu na velikosti svarové lázně, což splňovalo naše teoretické předpoklady. Tato závislost bude ověřena výpočtem vneseného tepla (kpt. 3.4). Pouze u vzorku č.1 (obr.36) (samotný laser) nedošlo k úplnému provaření svarové lázně po celé délce. Neprovařená oblast se nacházela na začátku svařovacího procesu, což by potvrdzovalo teoretické předpoklady o nutnosti předhřevu během svařování.



Obr. 36 Svařený vzorek č.1 – vrchní (vlevo) a spodní strana zkušební svaru (vpravo)

3.3 Metalografické analýza

Nedílnou součástí vyhodnocování experimentu je metalografická analýza, která zahrnuje pozorování makrostruktury a mikrostruktury v oblasti zkušební svaru. Umožňuje zkoumat rozměry svarové lázně, tepelně ovlivněné oblasti, odhalit případné svarové vady a v neposlední řadě prozkoumávat strukturu až na úrovni zrn. Analýza je realizována na tzv. metalografických výbrusech, kde je nutné dbát na velmi precizní zpracování. Vyhotovení výbrusu bylo prováděno na ÚPT v Brně, dle následujícího postupu:

- a) Nejprve byla zvolena vhodná oblast pro vyříznutí vzorku ze zkušební svaru. Pro detailnější porozumění, by bylo vhodné vyříznout několik vzorků z každé části svařovacího procesu. Z časových důvodů byla tato varianta zavrhnuta a pro každý svar byla zvolena pouze jedna oblast – uprostřed svař. procesu. Z této oblasti byl pomocí laseru vyříznut vzorek a označen číslem.

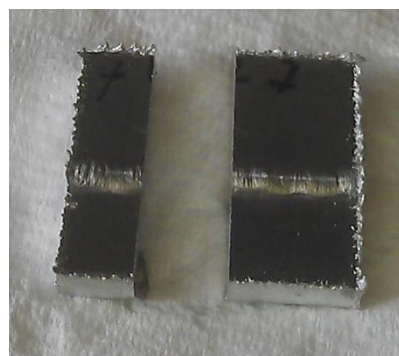


- b) Vzorek byl následně rozříznut kolmo ke svarové lázni (viz. obr. 37) pomocí přesné laboratorní pily MTH Mikron 110 (obr. 38). Intenzivní chlazení řezného kotouče zabraňuje tepelnému ovlivnění materiálu vzorku, které by případně mohlo způsobit nepřesné vyhodnocení pozorované struktury.

Obr. 38 Laboratorní pila Mikron 110

- c) Následovalo zalisování vzorků po dvou do polymerické hmoty, kterému předcházelo důkladné očištění a odmaštění nařezaných vzorků. Zalisování probíhalo na přístroji Stuers CitoPress-1 pod tlakem 250barů při teplotě 180 °C do formy puků o průměru 30 mm.

- d) Zalisované vzorky byly poté ustanoveny do zařízení Struers Tegamin-20 (obr.38), ve kterém probíhal proces broušení a leštění následujícím způsobem. Vzorky byly broušeny brusným kotoučem značky MD-Piano o zrnitosti 220 po dobu 2 minut, poté následovaly 3 procesy jemného broušení diamantovou suspenzí DiaDuo-2 (9 μm - 6 min.; 3 μm-3 min.; 1 μm – 2 min.). Nakonec byly vzorky leštěny křemíkovou suspenzí OP-U (40 nm) po dobu 2,5 min. Mezi jednotlivými operacemi byly vzorky opláchnuty pod tekoucí vodou a vloženy do ultrazvukové pračky Ulsonix proclean 2.0 M (obr.39), která zaručila precizní zbavení všech nežádoucích nečistot.



Obr. 37 Vedení řezu vzorkem



Obr. 38 Metalografická bruska/leštička Struers Tegamin-20

- e) Pro finální vyobrazení struktury svaru bylo nutné vzorky naleptat leptadlem Weck (100 ml H₂O, 4 g KMnO₄, 1 g NaOH) po dobu 15 s. Následně byl proveden oplach vodou, který částečně zamezil proces leptání. Pro úplné vypláchnutí zbytků leptadla byla použita ultrazvuková pračka (viz. kpt.3.3d). Posledními kroky bylo opláchnutí vzorků lihem, který zamezil tvorbě map, a usušení průmyslovým fénem.



Obr. 39 Ultrazvuková pračka Ulsonix



Obr. 40 Mikroskop Olympus SC50

3.3.1 Analýza makrostruktury

Zkoumáním makrostruktury v oblasti zkušební svaru umožňuje vyhodnotit rozměry svarové lázně i tepelně ovlivněné oblasti. V neposlední řadě slouží k odhalení svarových vad, např. vměstků, horkých trhlin a zejména pórovitosti. Analýza makrostruktury byla provedena na optickém mikroskopu Olympus SC50 (obr.40). Pomocí softwaru pak byly přiřazeny ke makroskopickým snímkům kóty svarové lázně. Pro názornost byly použity pouze dva vzorky od každé slitiny: bez a s nejvyšší hodnotou předehřevu. Ostatní snímky makrostruktury jsou součástí přílohy 5 a 6.

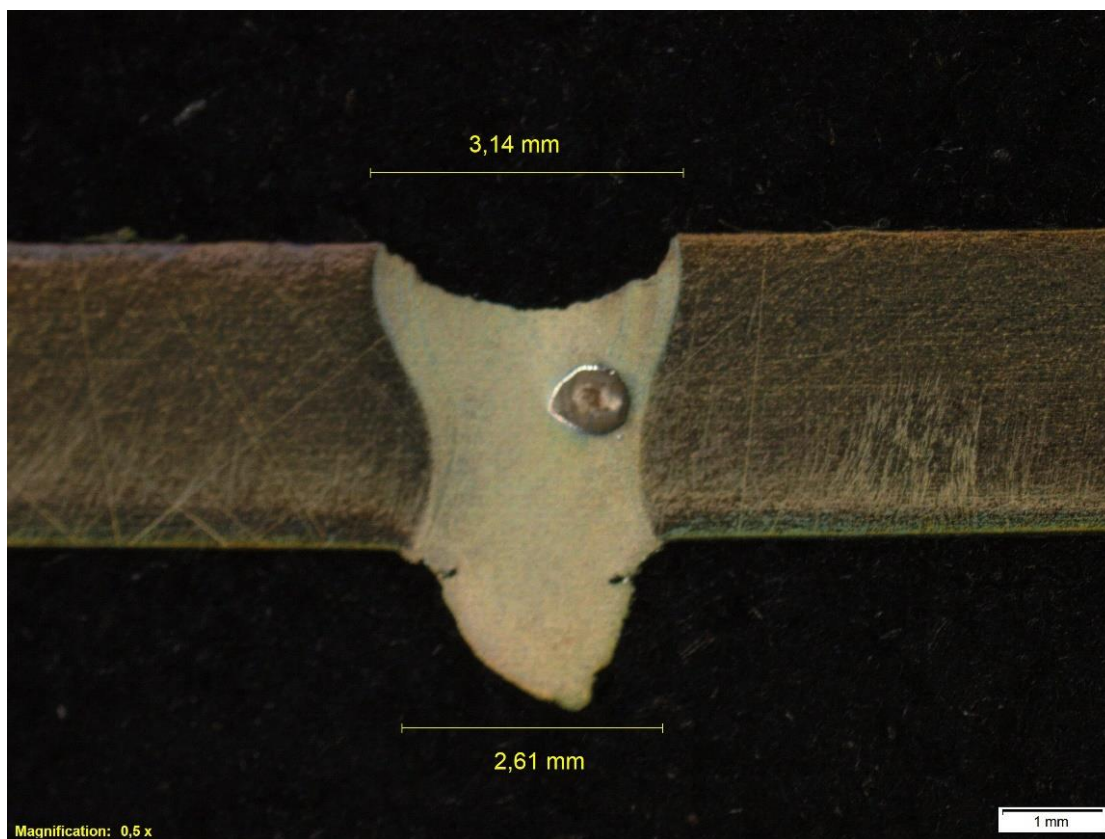
- EN AW-5754 H22

Na snímcích 41 a 42 je patrný vliv vneseného tepla na geometrii svaru, především pak ve spodní části. Zkušební svar vyhotovený pouze samotným laserem (obr. 41) se vyznačuje velkým propadem kořene i líce svaru. S rostoucí teplotou předhřevu se propadení v oblasti líce minimalizuje. Nepodařilo se rozpoznat oblast tepelně ovlivněné oblasti, proto nebyla do snímků zakótována.

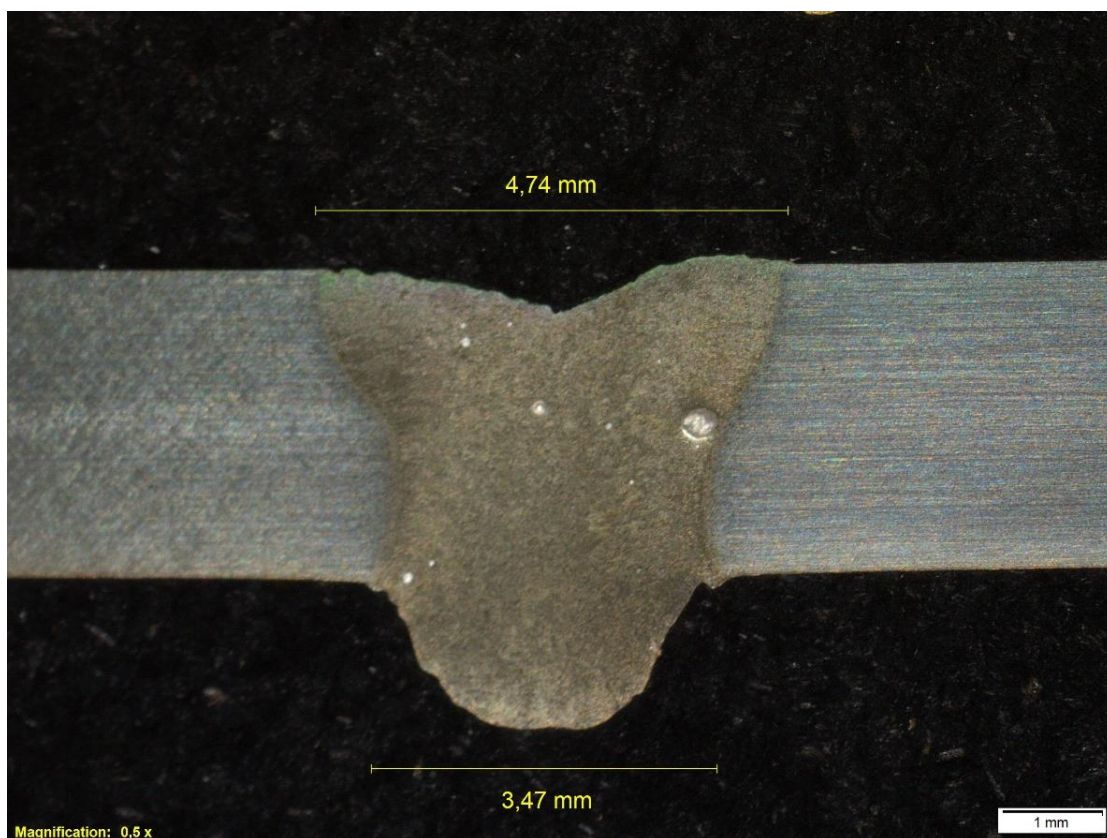
- EN AW-6082 T6

Zkoumané svary se vyznačují menším propadem kořene než u předešlé slitiny. Jak můžeme vidět na obrázcích 43 a 44, s rostoucím množstvím vneseného tepla roste velikost teplotně ovlivněné oblasti i šířka kořene svaru.

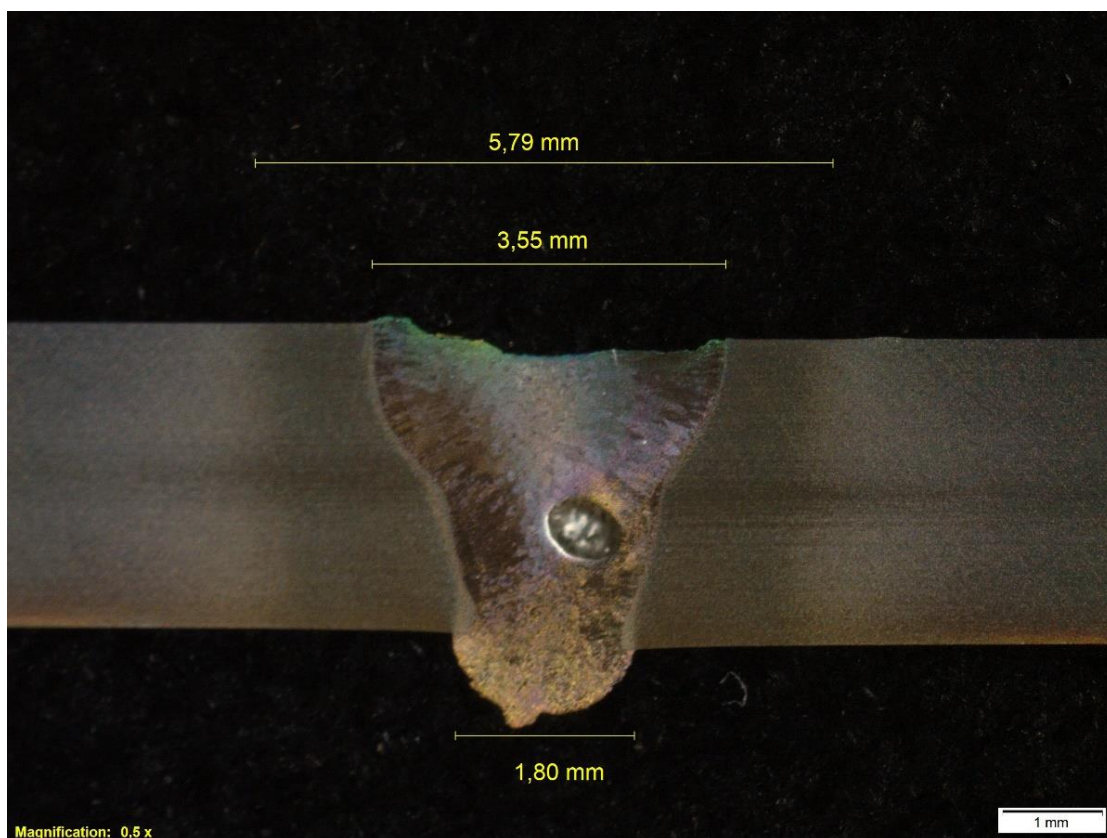
Naměřené rozměry zkušebních svarů byly zpracovány do sloupcových grafů (viz. příloha 9), ze kterých je patrná rostoucí závislost předehřevu na rozměrech svaru.



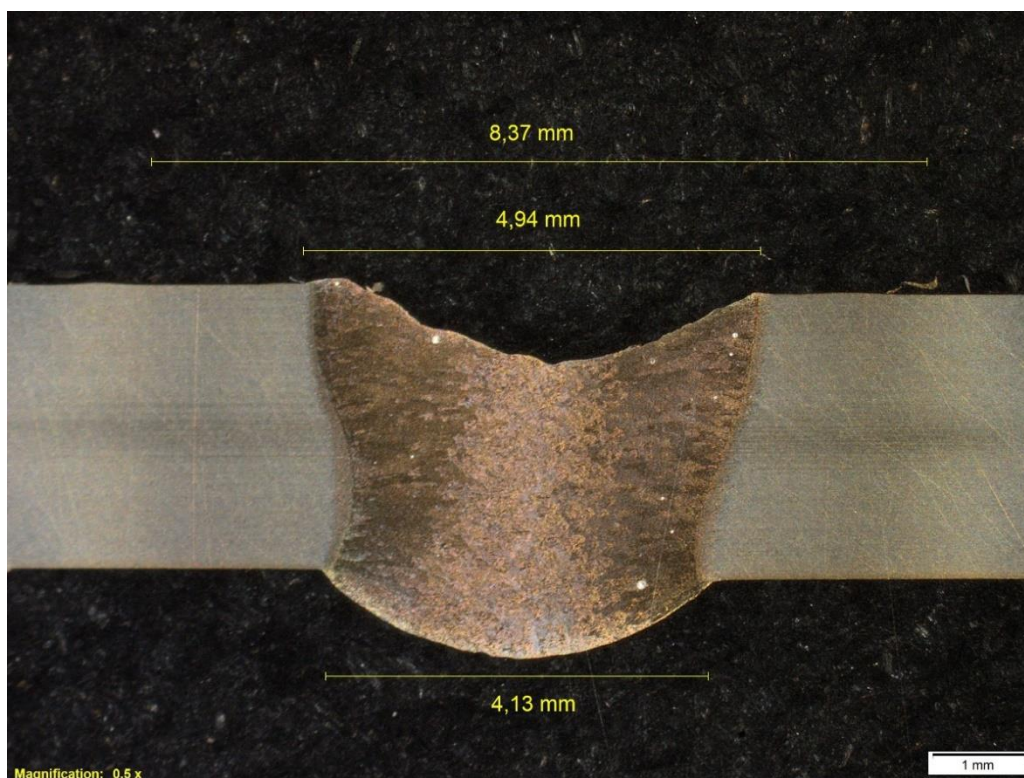
Obr. 41 Vzorek č.1 EN AW-5754 H22 (laser)



Obr. 42 Vzorek č.4 EN AW-5754 H22 (laser-TIG 60A)



Obr. 43 Vzorek č.5 EN AW-6082 T6 (laser)



Obr. 44 Vzorek č.8 EN AW-6082 T6 (laser-TIG 60A)

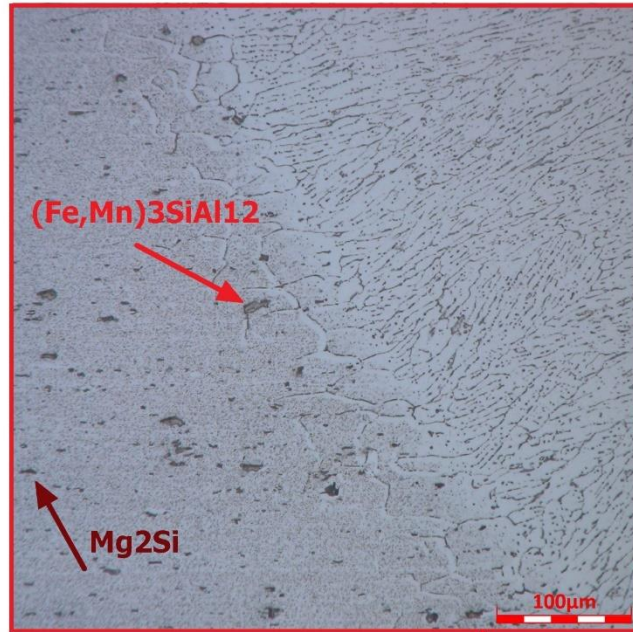
3.3.2 Analýza mikrostruktury

Po vyhodnocení makrostruktury následovala analýza mikrostruktury. Pro vyvolání mikrostruktury bylo nutné vzorky přeleptat leptadlem Fuss (1000ml H₂O, 7,5ml HF, 25ml HCl, 8ml HNO₃). Dokumentace mikrostruktury byla realizována pomocí optodigitálního mikroskopu Olympus-DSX510, který umožňuje až 9000-násobné zvětšení. Pro lepší názornost byly pořízené snímky mikrostruktury upraveny v grafickém programu PicPick.

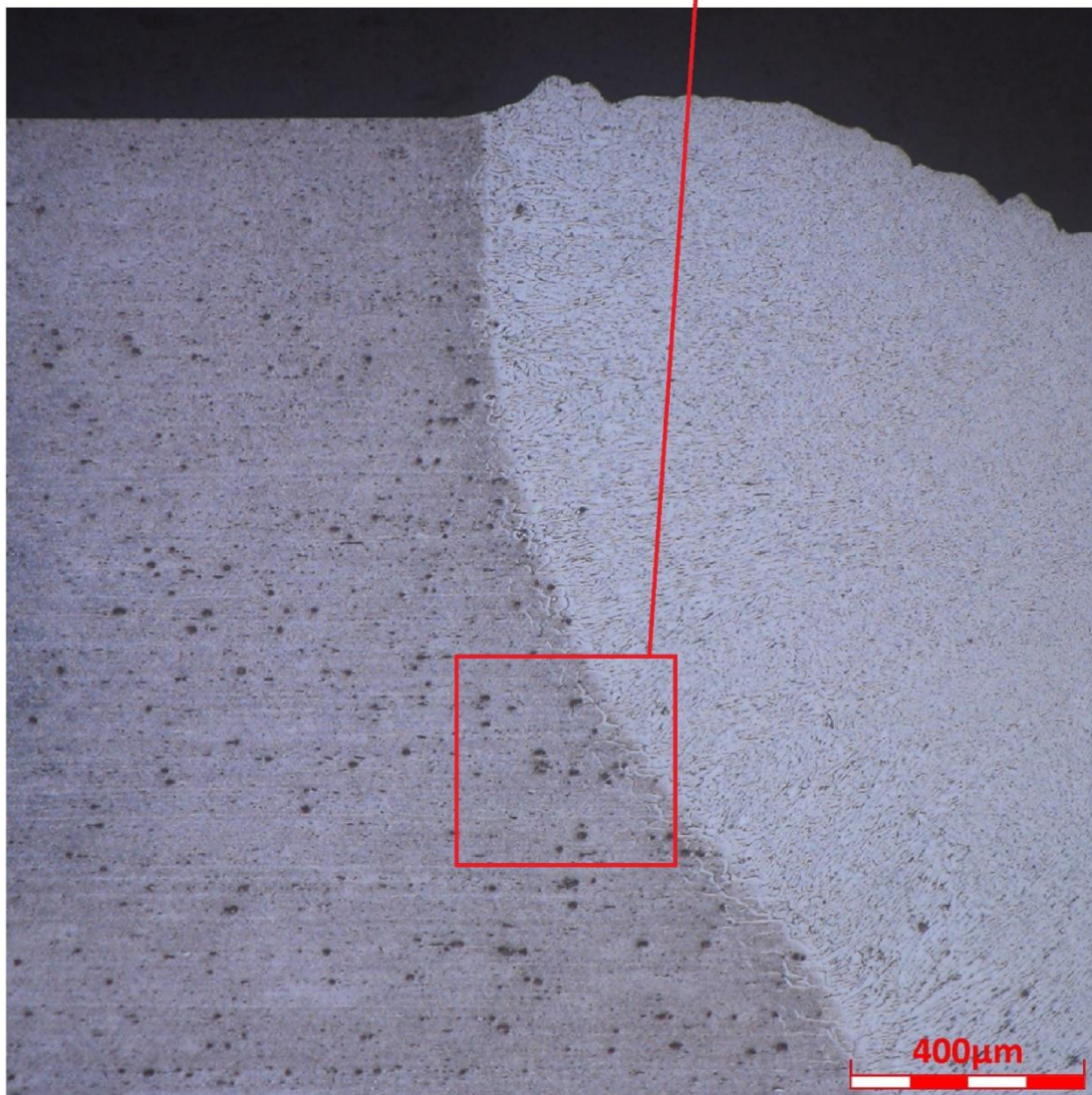
Svarový kov je tvořen dendritickou strukturou tuhého roztoku alfa s vyloučenými drobnými intermetalickými částicemi na bázi příměsových prvků v mezidendritických prostorech. Základní matrice je tvořena tuhým roztokem alfa s hrubými částicemi intermetalické fáze uspořádané v řádcích plus drobné intermetalické částice.

- EN AW-6082 T6

Na základě podobnosti byla pomocí Atlasu materiálových struktur vytvořena chemická mikroanalýza částic, která je vyobrazena na snímku 45. Mikrostruktura je tvořena tuhým roztokem alfa + hrubé částice (Fe, Mn)₃SiAl₁₂ + Mg₂Si + disperze extrémně jemných intermetalických částic, převážně na bázi chromu. Na vzorcích č.5 (obr. 46), 6 a 7 je v tepelně ovlivněné oblasti detekován výskyt téměř souvislé sítovité intermetalické fáze. Tento typ vyloučení křehké intermetalické fáze je velmi nežádoucí a nevhodný, jelikož dochází k významnému poklesu houževnatosti materiálu. S tím úzce souvisí nárůst křehkosti, která zvyšuje riziko porušení v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Obecně je možné konstatovat, že s poklesem houževnatosti dochází k nárůstu tvrdosti. Tento předpoklad bude ověřen v kapitole 3.5 zkouškou tvrdosti podle Vickerse. U vzorku č.8 (obr. 47) se souvislé síťování v oblasti TOO neobjevuje, je možné předpokládat, že vyšší hodnoty předehřevu mají kladné účinky na TOO. Ostatní snímky mikrostruktury jsou obsaženy v příloze č. 8.



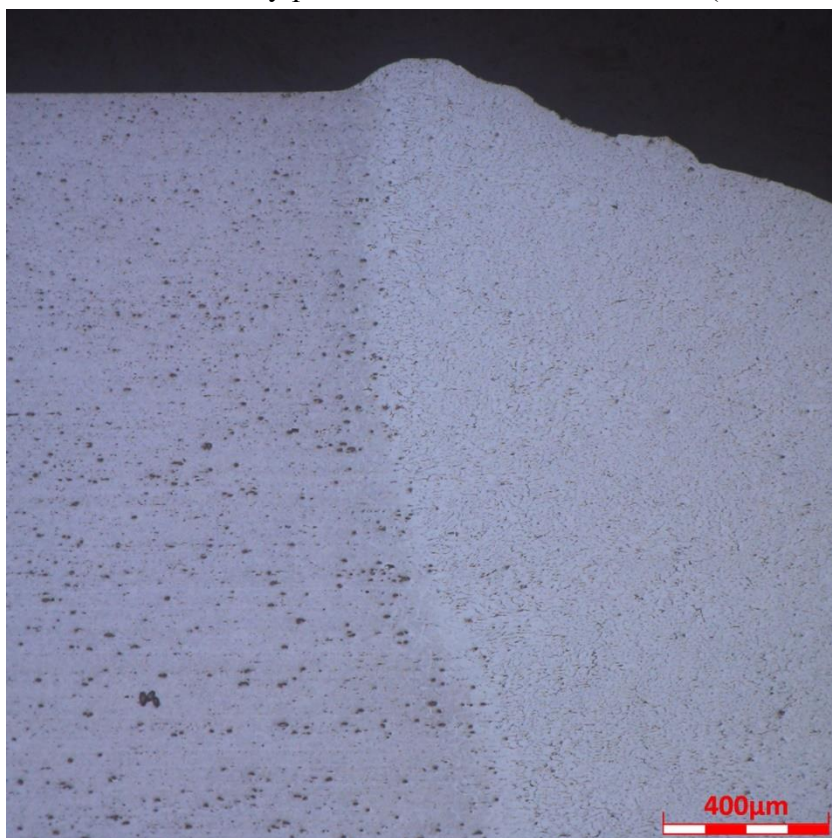
Obr. 46 Chemická mikroanalýza vzorek č.5 (laser)



Obr. 47 Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.5 (laser)



Obr. 48 Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)

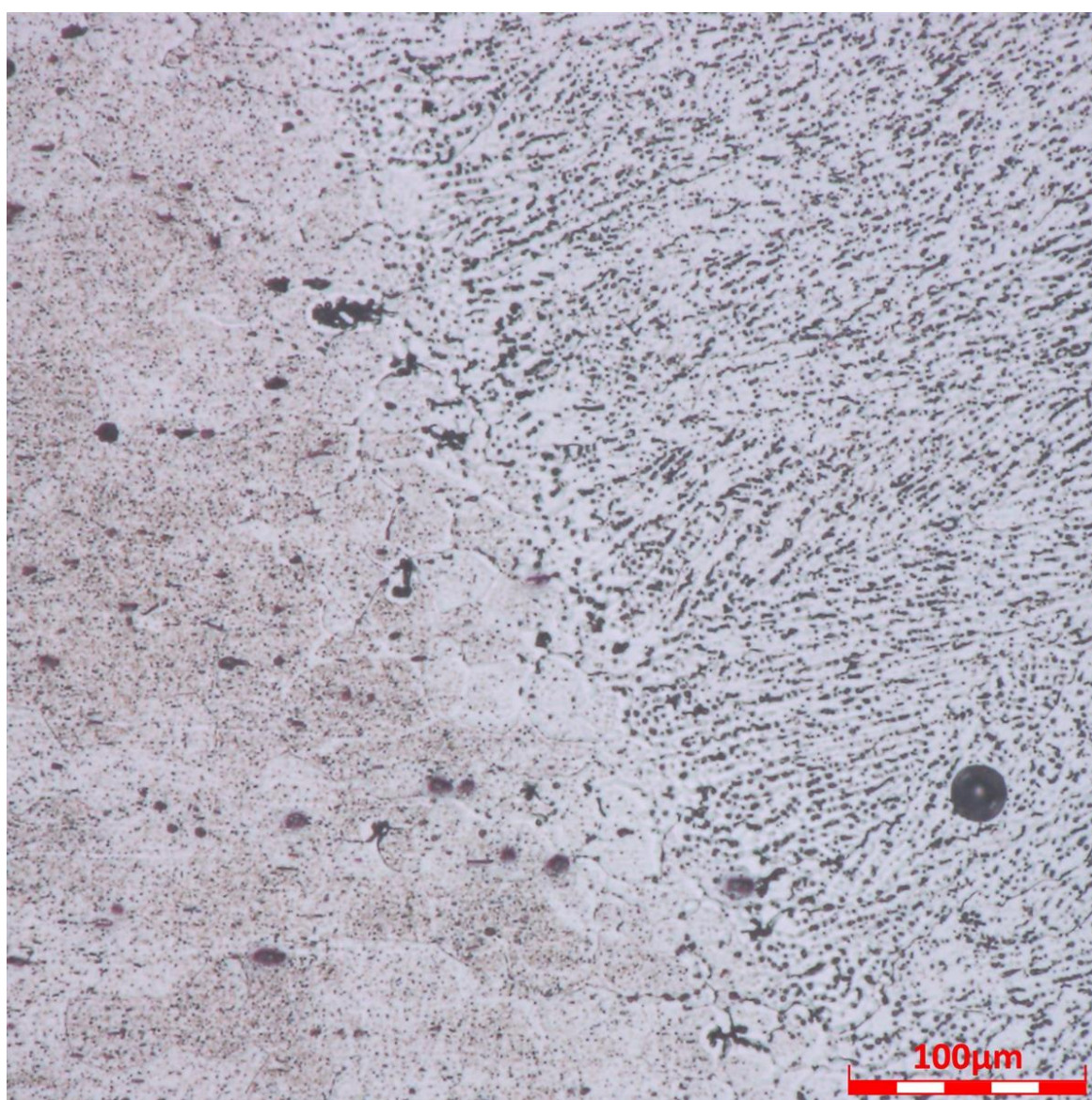


Obr. 49 Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)

- EN AW-5754 H22

Mikrostruktura této slitiny má obdobný charakter jako předešlá, jen s vyšším obsahem příměsových prvků. V Atlasu materiálůvých struktur neměla zastoupení, z tohoto důvodu nebyla provedena chemická mikroanalýza, přesné složení můžeme pouze odhadovat. Příměsové prvky vedou k tvorbě intermetalických fází, tzn. u této slitiny je mnohem větší objemový podíl intermetalických fází než u EN AW-6082 T6. Tento fakt vede k vyšší náchylnosti na tvorbu nežádoucích sít'oví v tepelně ovlivněné oblasti. Avšak ani u jednoho ze vzorků nebyla detekována toto nerovnoměrné rozložení fází. Což si následně ověříme z průběhů tvrdostí jednotlivých vzorku v kapitole 3.5.

Pro demonstraci je přiložen snímek detailu mikrostruktury vzorku č.2 (obr. 50), ostatní snímky jsou obsaženy v příloze 7.



Obr. 50 Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.2 (laser-TIG 20A)

3.4 Výpočet vneseného tepla

Vzorový výpočet pro vzorek č.2:

- Vnesené teplo pro samotné laserové svařování
 - výkon laseru, $P = 2000 \text{ W}$
 - svařovací rychlost, $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 - koeficient účinnosti pro laser, $K_{las} = 0,75$

$$Q_{las} = \frac{K_{las} \cdot P}{v_s} = \frac{0,75 \cdot 2000}{20} = 75 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Vnesené teplo pro samotný přehřev TIG AC
 - svařovací rychlost, $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 - svařovací napětí, $U = 15,2 \text{ V}$
 - svařovací proud, $I = 20 \text{ A}$
 - koeficient účinnosti pro TIG, $K_{tig} = 0,6$

$$Q_{TIG} = \frac{K_{tig} \cdot I \cdot U}{v_s} \cdot K_{tigAC} = \frac{0,6 \cdot 15,2 \cdot 20}{20} \cdot 0,5 = 4,56 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

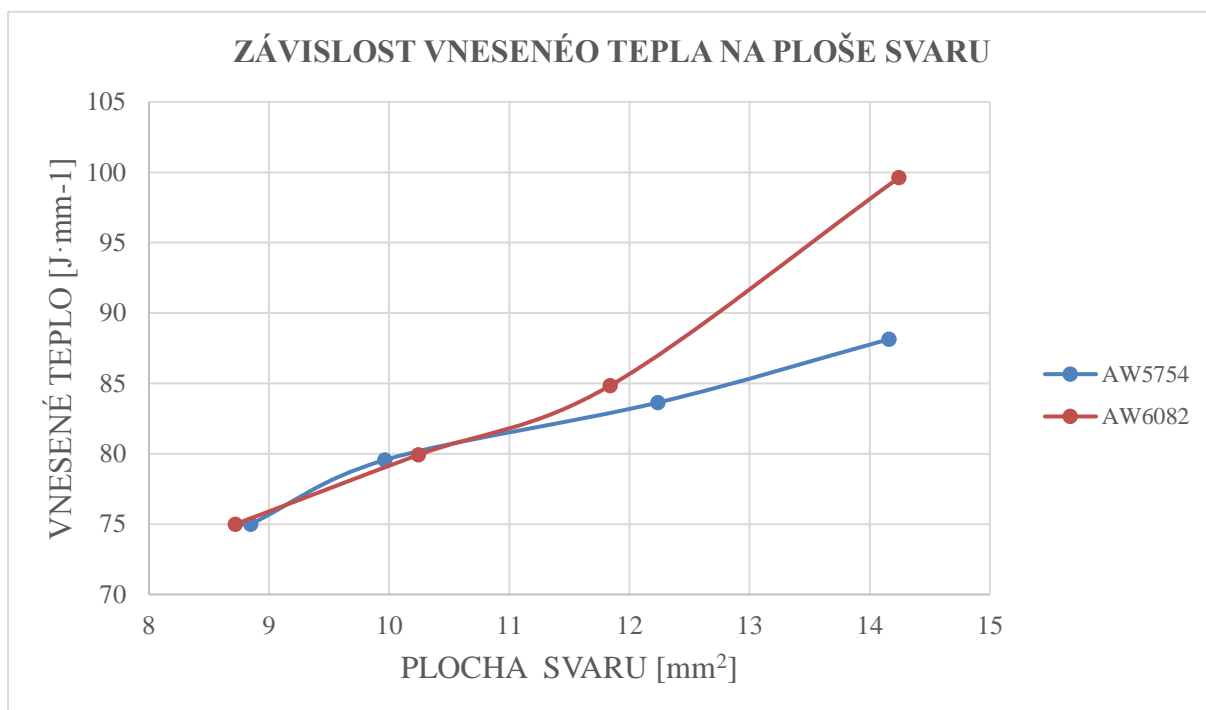
- Vnesené teplo pro hybridní svařování laser-TIG

- $Q_{LasTIG} = Q_{las} + Q_{tig} = 75 + 4,56 = 79,56 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$

Vypočítané hodnoty vneseného tepla pro všechny vzorky byly zpracovány do tabulky 10 z které byla následně vytvořena závislost vneseného tepla na ploše svaru (obr. 51). Pomocí softwaru ImageJ byly zjištěny hodnoty ploch svarů.

Tab.10 Vypočítané hodnoty vneseného tepla

Vypočítané hodnoty vneseného tepla			
Číslo vzorku	Plocha svaru [mm ²]	Vnesené teplo Q[J·mm ⁻¹]	Svařovací proud [A]
EN AW-5754 H22			
1	8,847	75	0
2	9,965	79,56	20
3	12,238	83,64	40
4	14,162	88,14	60
EN AW-6082 T6			
5	8,721	75	0
6	10,243	79,92	20
7	11,839	84,84	40
8	14,244	99,62	60



Obr. 51 Graf závislosti vneseného tepla na ploše svaru

Z grafu (obr. 51) je patrná rostoucí závislost vneseného tepla na ploše svaru čili se zvětšující hodnotou proudu předehřevu roste i velikost svarové lázně. Z vypočítaných hodnot pro jednotlivé metody je evidentní, že největší podíl vneseného tepla při hybridním svařování laser-TIG zastupuje právě laser. Díky vysoké hustotě energie laserové svazku vzniká samotný průvar základním materiálem a vnesené teplo elektrickým obloukem plní pouze funkci předehřevu.

3.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

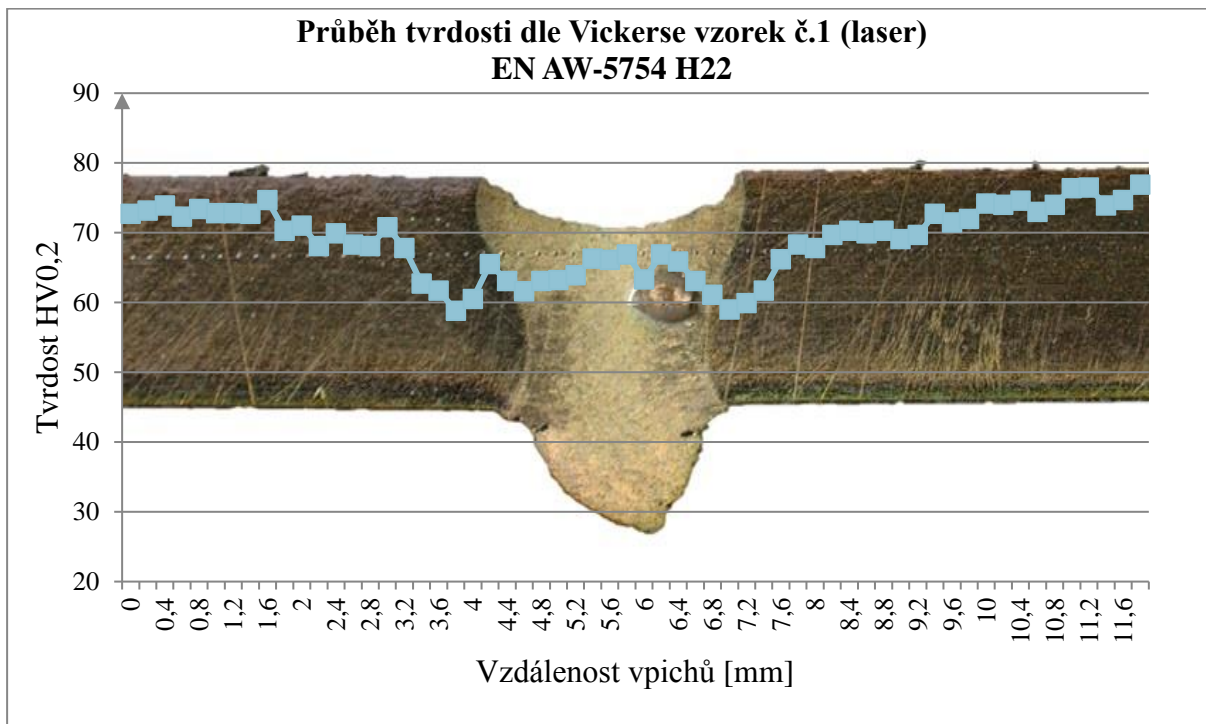
V rámci experimentu byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse, dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na tvrdoměru Zwick 3212 (obr. 52). Měření bylo realizováno na zalisovaných vzorcích, které byly použity na vizuální analýzu. Vzhledem k materiálu, velikosti zrna a heterogenitě bylo zvoleno zatížení HV0,2 po dobu 20 s. Celkový rozsah měření byl 12 mm s krokem 0,2 mm, což umožnilo sledovat tvrdost základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti, svarového kovu i přechodových oblastí. Povrch vzorku byl monitorován CCD kamerou, která je součástí měřícího tvrdoměru. Obraz je promítán na monitor počítače, kde následně byly ručně označeny úhlopříčky vtisku. Tyto hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru tvrdoměru testXpert, který vyhodnotil naměřenou tvrdost. Vzorky podrobené zkoušce tvrdosti byly znovu nafoceny pomocí mikroskopu Olympus SC50 (obr. 40). Na závěr byly nafocené snímky zakomponovány do grafů průběhu tvrdosti v závislosti na poloze vtisku.



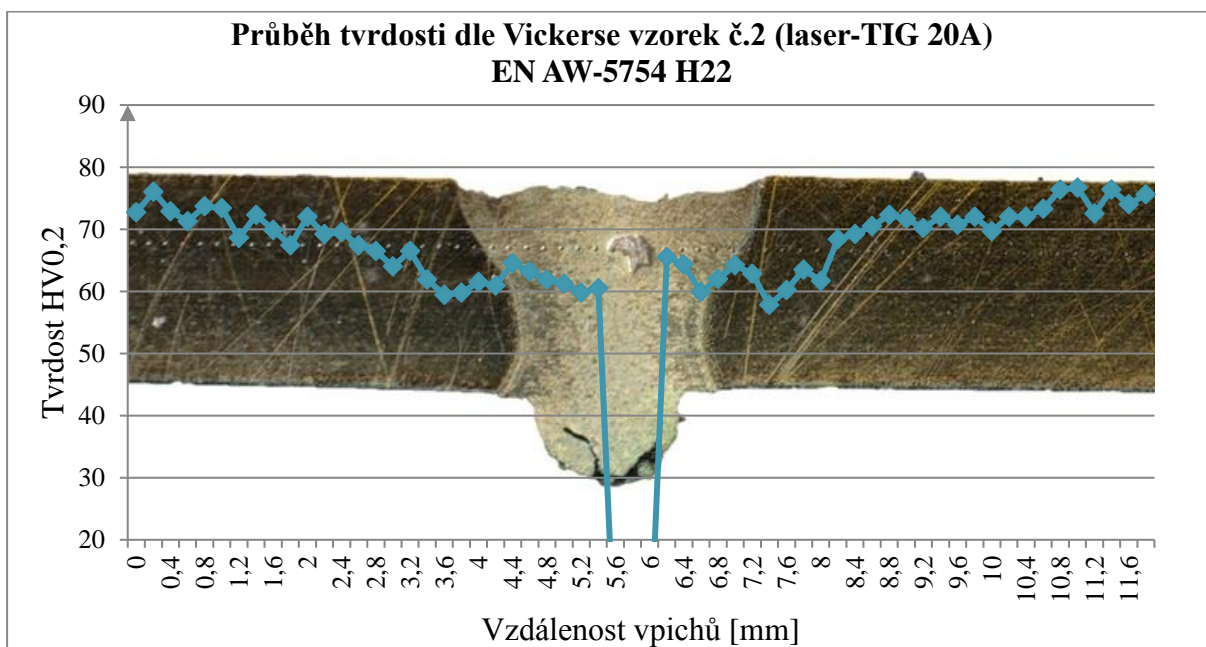
Obr. 52 Tvrdoměr Zwick 3212

Průběhy tvrdosti slitiny EN AW-5756 H22 jsou vyobrazeny na obrázcích 53 a 56. Pouze u vzorku č.2 (obr. 52) došlo k chybě vlivem nesprávného rozvržení měření. Z důvodu výskytu póru v měřeném úseku 5,6 až 6 mm byly naměřeny nulové hodnoty tvrdosti. Všechny měřené vzorky se vyznačují stejnou charakteristikou průběhu tvrdosti. Největší hodnoty tvrdosti byly naměřeny v základním materiálu, k významnému poklesu hodnot došlo v tepelně ovlivněné oblasti. V přechodové oblasti mezi TOO a svarovým kovem byl pozorován mírný nárůst tvrdosti. Naměřené hodnoty se pohybují v rozsahu 56-80 HV0,2.

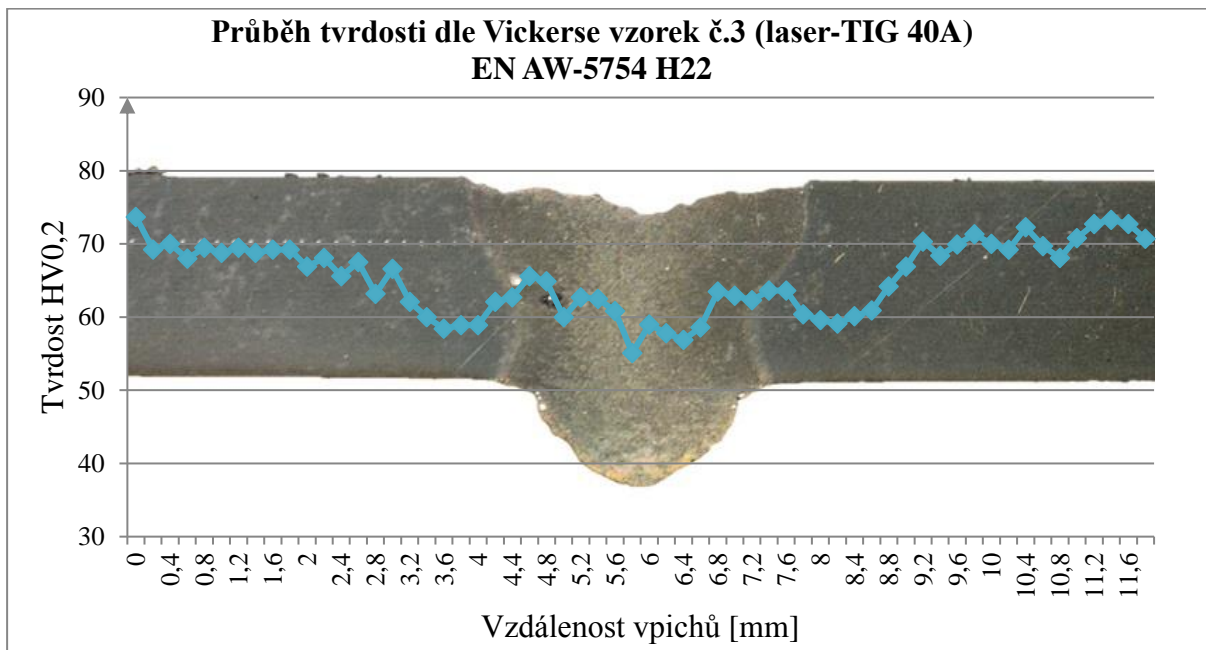
Na obrázcích 57 až 60 jsou patrné průběhy tvrdosti vytvrditelné slitiny EN AW-6082 T6. Měření potvrdilo naše teoretické předpoklady o řádově vyšší tvrdosti než u slitiny řady 5000. Naměřené hodnoty se pohybují v rozsahu 60-102 HV0,2. Mají podobnou charakteristiku průběhu tvrdosti jako EN AW-5756 H22, s výjimkou nárůstu v přechodové oblasti. Ve svarovém kovu dochází k rapidnímu poklesu tvrdosti až o 35 HV0,2. Vzorek č.5 (obr. 57) vykazuje anomální průběh tvrdosti v okolí osy svaru, dochází k nárůstu tvrdosti až o 20 HV0,2. Další anomálii je pozorována u vzorku č.6 (obr. 58), kde taktéž dochází k neočekávanému vzrůstu tvrdosti pouze na jedné straně TOO.



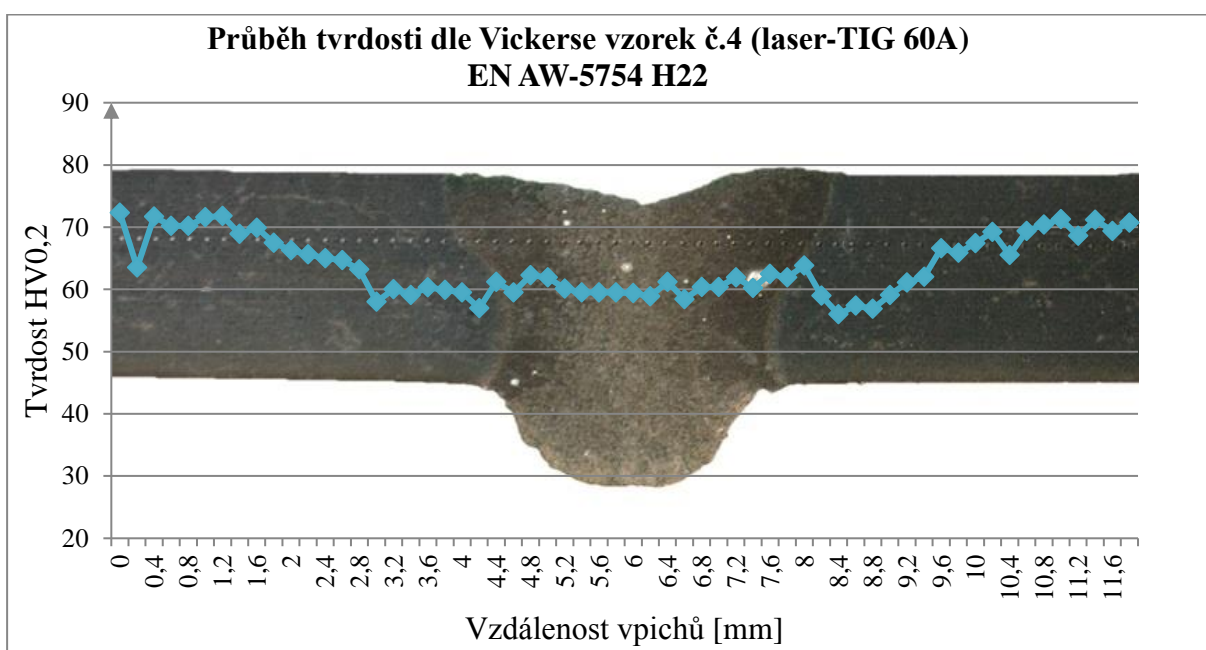
Obr. 53 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.1 (laser)



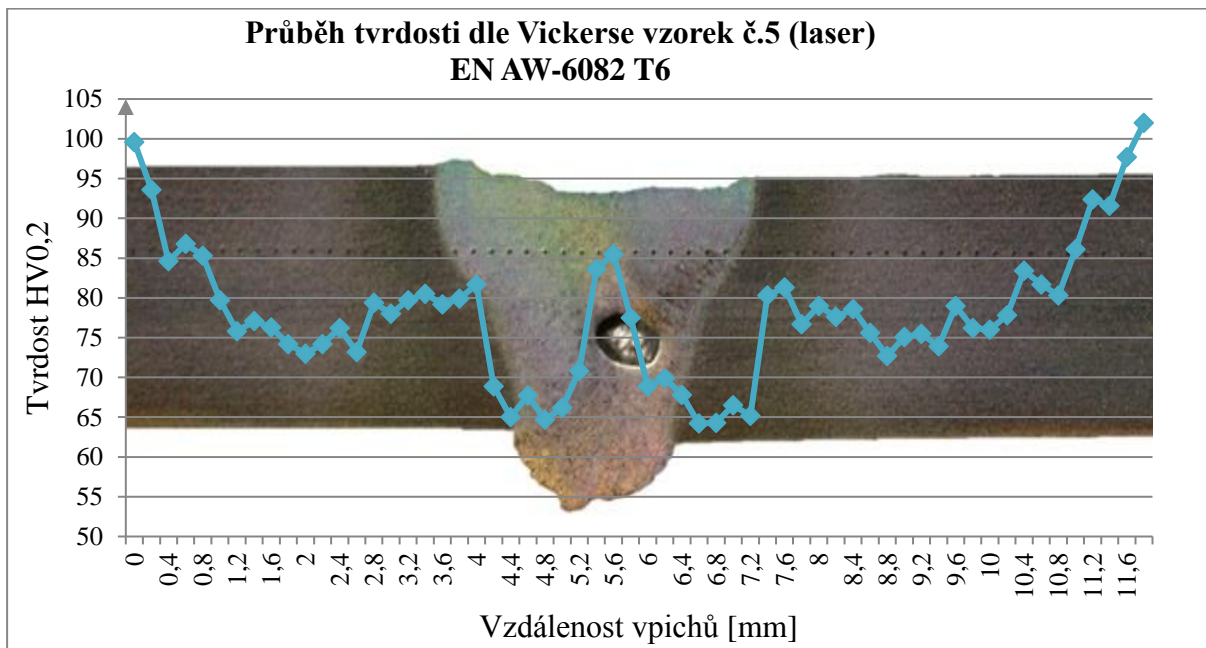
Obr. 54 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.2 (laser-TIG 20A)



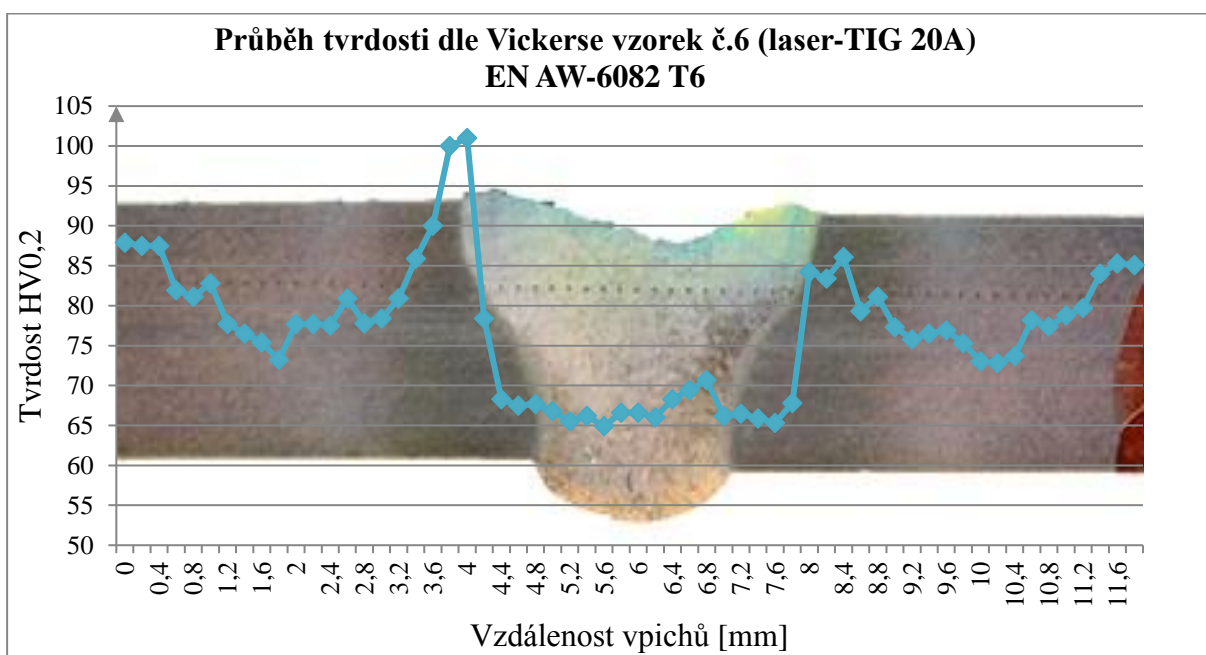
Obr. 55 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.3 (laser-TIG 40A)



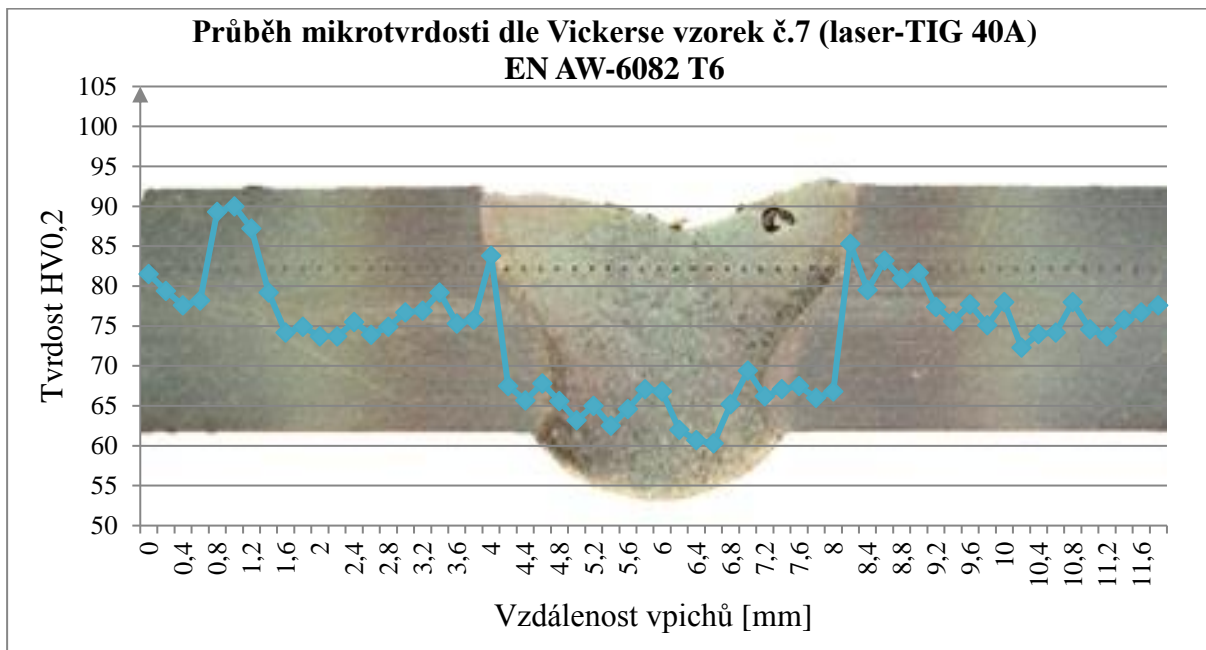
Obr. 56 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.4 (laser-TIG 60A)



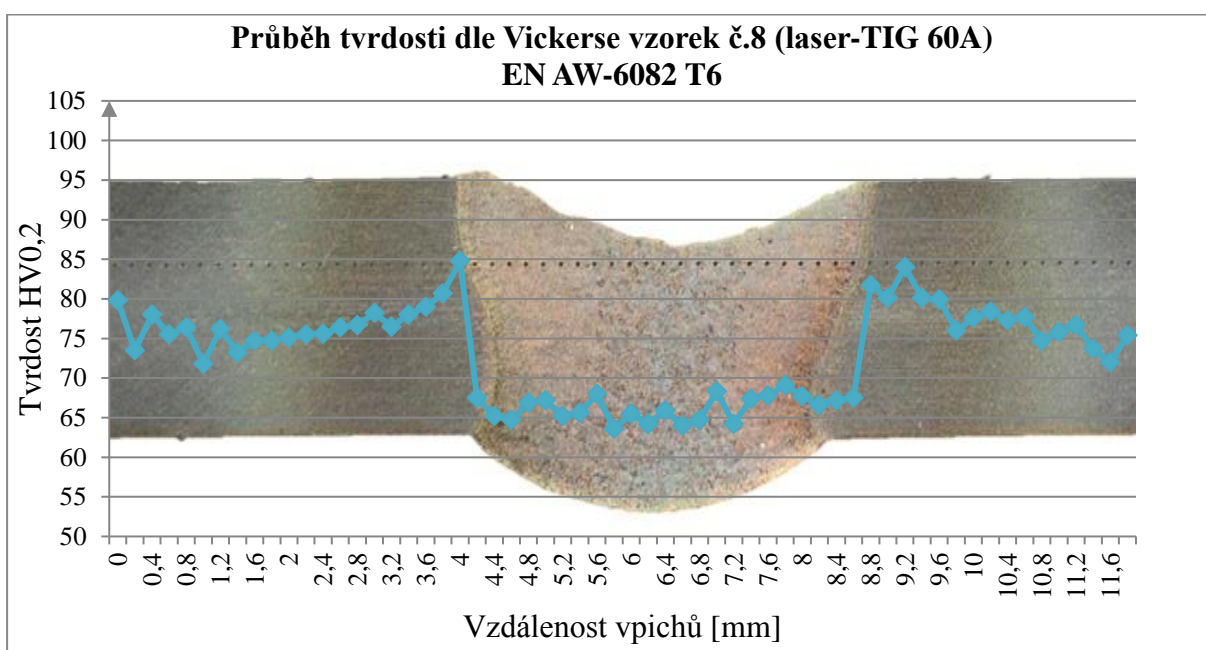
Obr. 57 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.5 (laser)



Obr. 58 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.4 (laser-TIG 60A)



Obr. 59 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.7 (laser-TIG 40A)



Obr. 60 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.8 (laser-TIG 60A)

3.6 Zkouška tahem

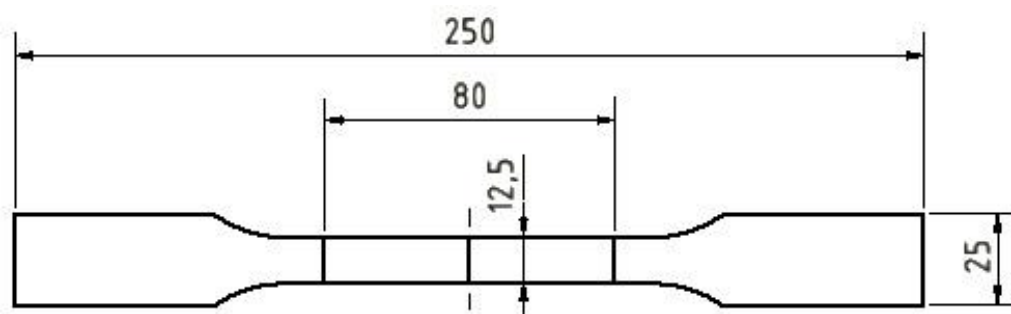
Poslední část experimentu byla zaměřena na zkoumání napěťových a deformačních veličin získaných pomocí zkoušky tahem. Ze zkušebních svarů byly laserem vyřezány vzorky pro tahovou zkoušku, a to v sérii po třech pro každý zkušební svar. Pomocí brusného papíru o zrnitosti 500 byly vzorky zbaveny nechtěných otřepů po laserovém řezání. Následně byly digitálním posuvným měřidlem změřeny počáteční šířky b_0 , a to na třech místech vzorků.

Z naměřených hodnot byl pro dílčí vzorek stanoven aritmetický průměr, který sloužil jako vstupní hodnota pro tahovou zkoušku. Nakonec na všech vzorkách byla vyznačena počáteční měřená hodnota $L_0=80$ mm a jednotlivé vzorky byly označeny čísly. Z praktických důvodů bylo označení prováděno lihovým fixem, nikoliv rýsovací jehlou. Ta by mohla způsobit vrub a následný předčasný lom, který by zkreslil výsledky zkoušky. Samotná realizace zkoušky byla provedena na ústavu strojírenské technologie na hydraulickém zkušebním stroji ZD40. Popis stroje a jeho technické parametry jsou uvedeny v příloze č.4. V rámci zkoušky byla zvolena zatěžovací rychlost $8 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí softwaru M-TEST, který umožnil grafické zpracování.

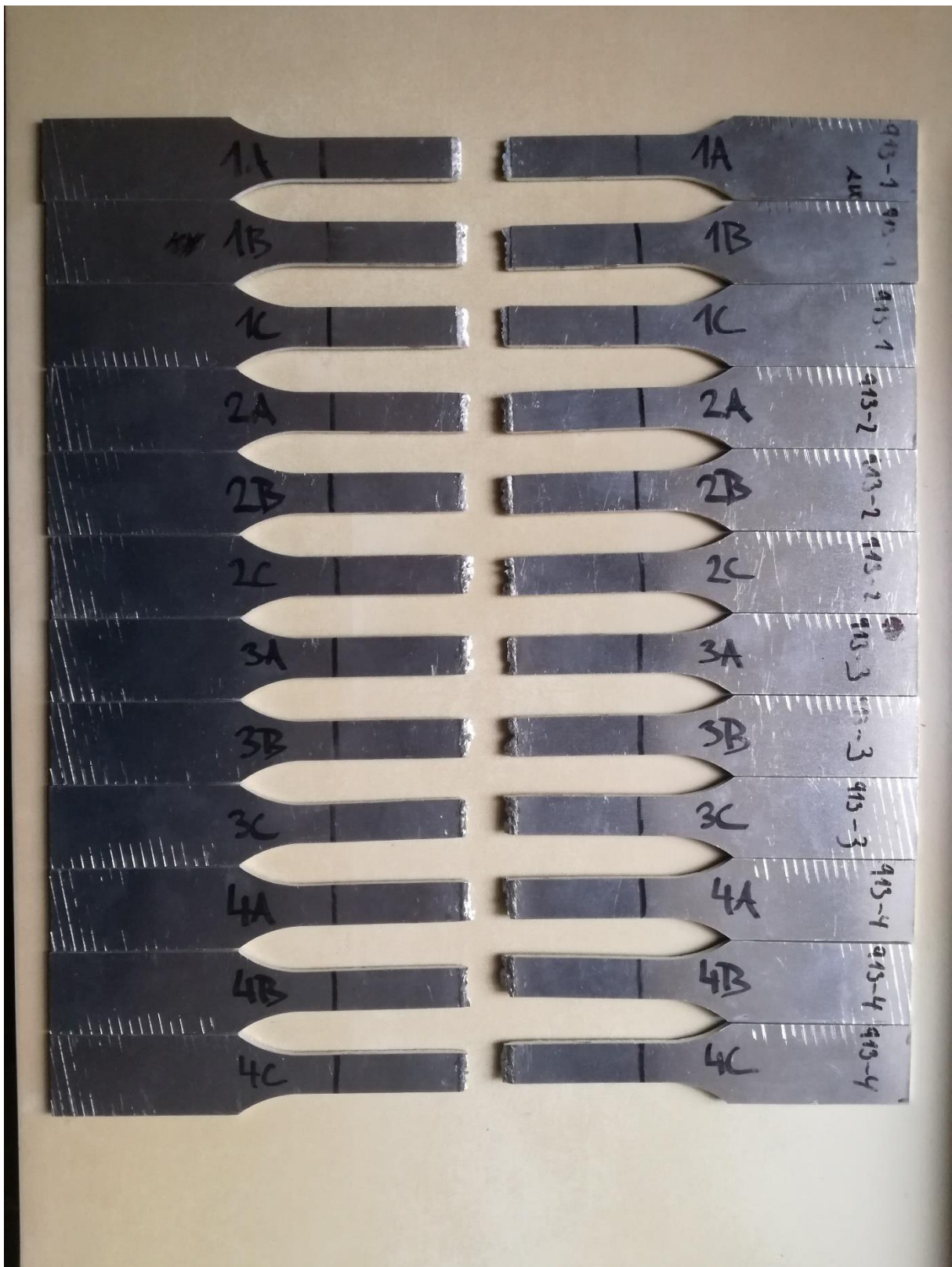
Zkušební vzorky po tahové zkoušce jsou vyobrazeny na obrázcích 63 a 64. Charakteristika průběhu zkoušky byla u všech vzorků stejná. Lom proběhl vždy ve svaru, tudíž ještě před mezí kluzu. Naměřené hodnoty tažnosti, meze kluzu a meze pevnosti jsou fiktivní a nemohou být považované za reálné. Tento fakt poukazuje na nedostatečné mechanické vlastnosti svarového spoje. Smluvní tahové diagramy jsou znázorněny na obrázcích 65 až 73. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do sloupcových grafů (obr. 74 a 75).



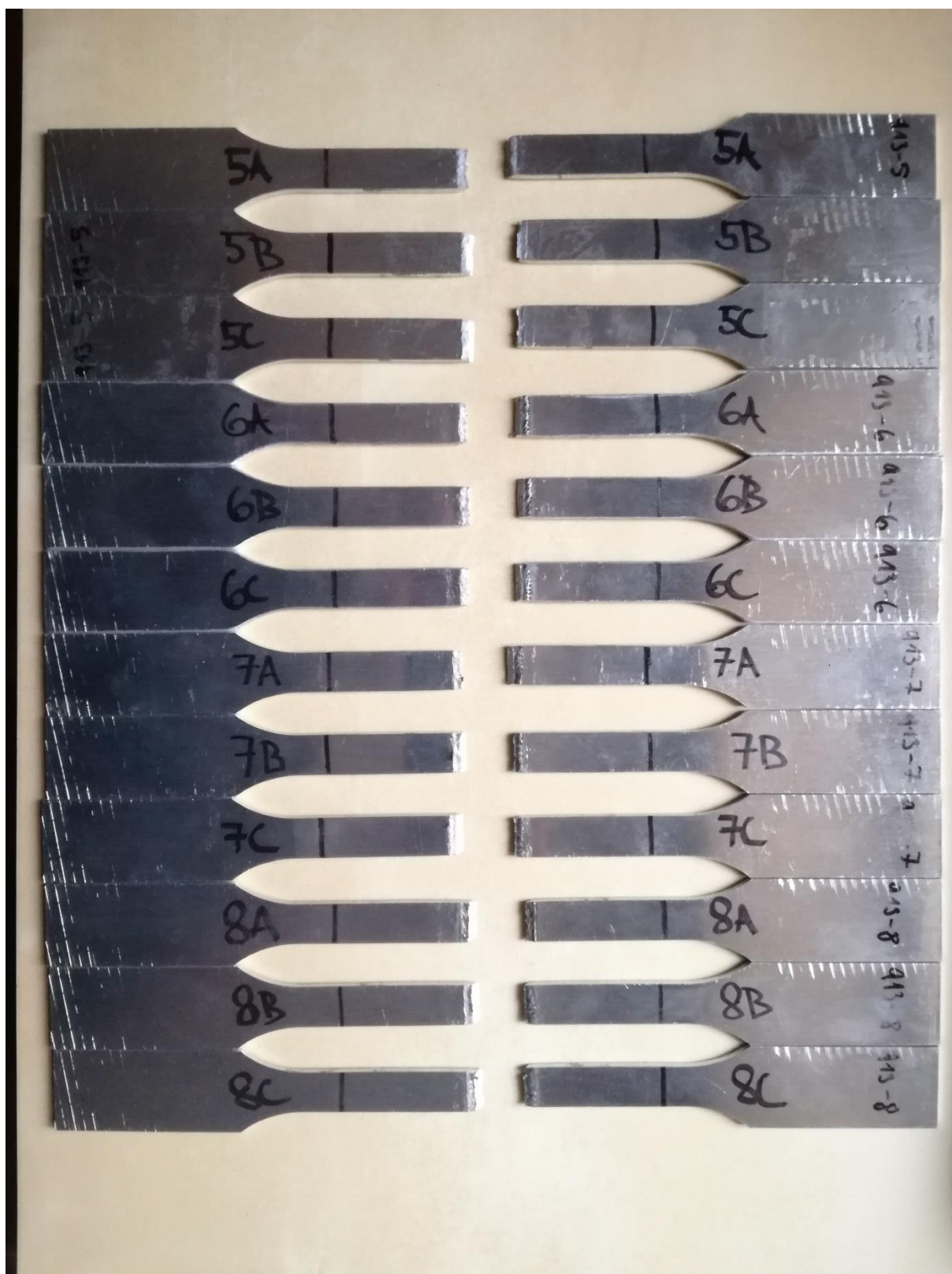
Obr.61 Upnutí zkušebního tělesa



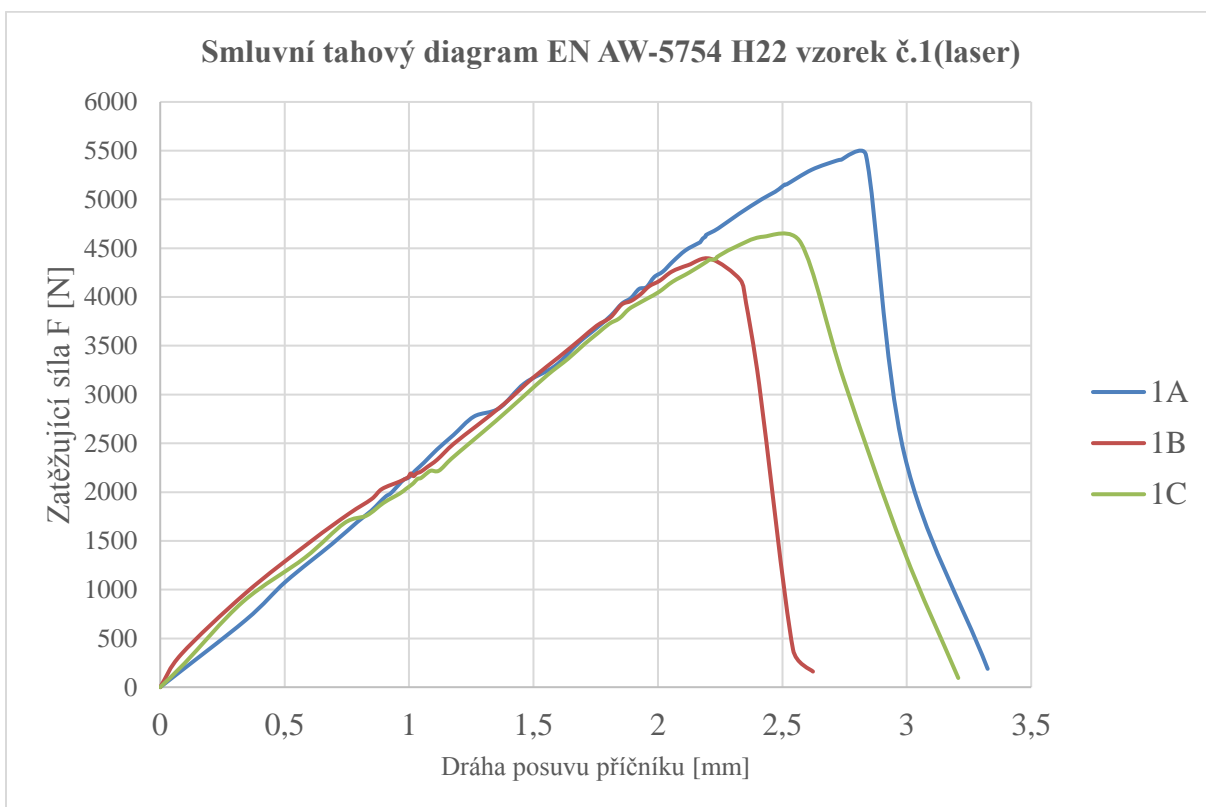
Obr.62 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku



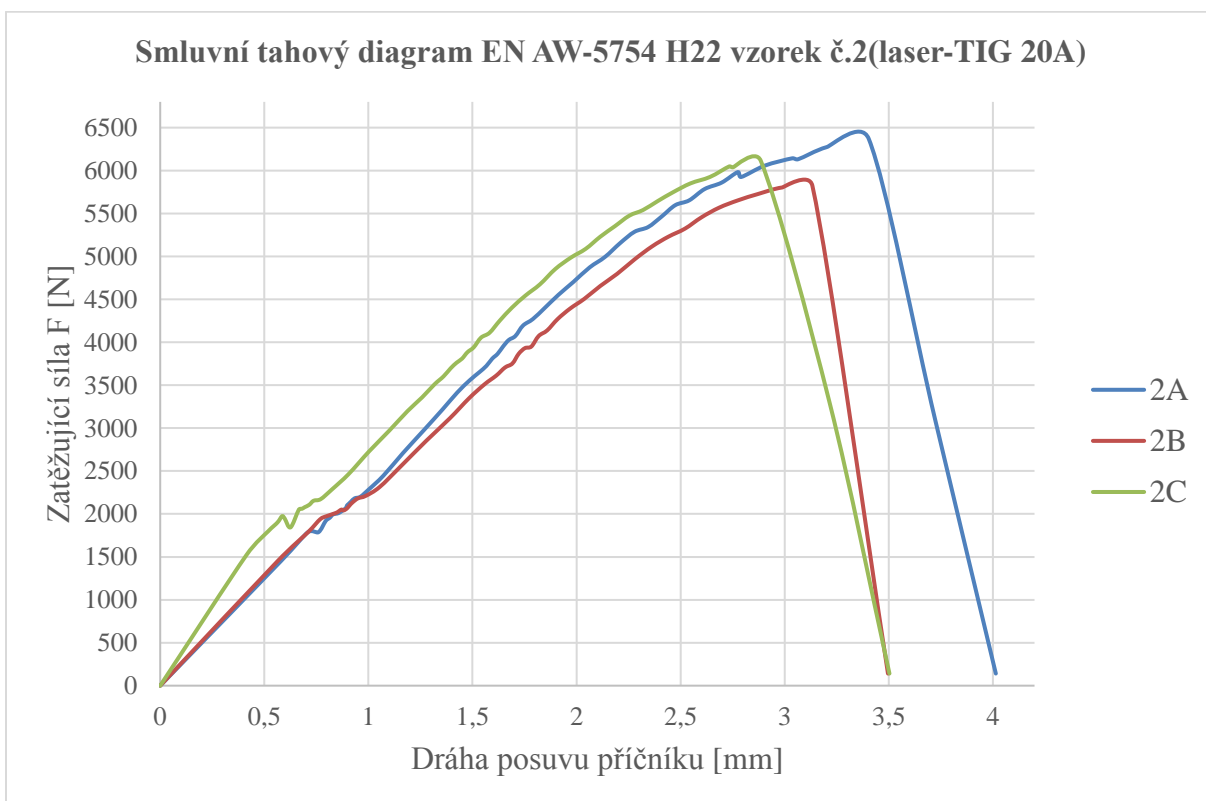
Obr. 62 Zkušební vzorky po tahové zkoušce č.1 až č.4. (EN AW-5754 H22)



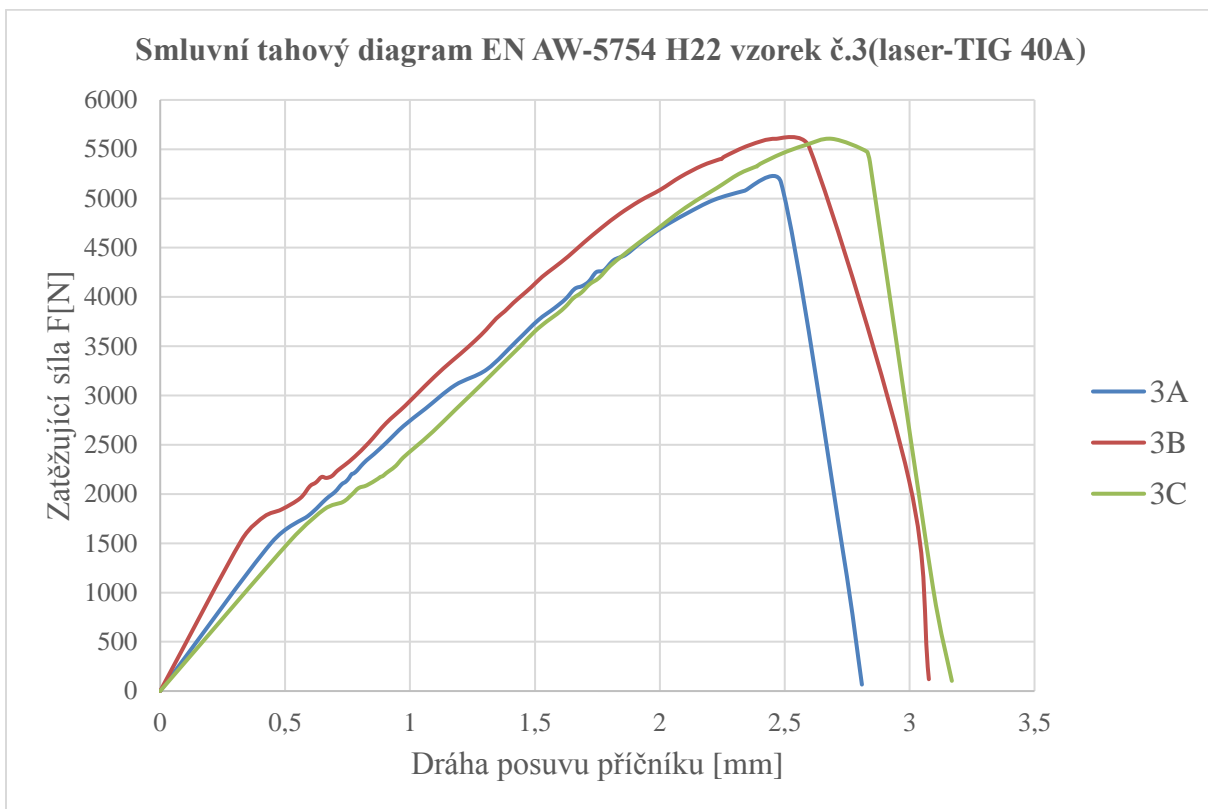
Obr. 63 Zkušební vzorky po tahové zkoušce č.5 až č.8. (EN AW-6082 T6)



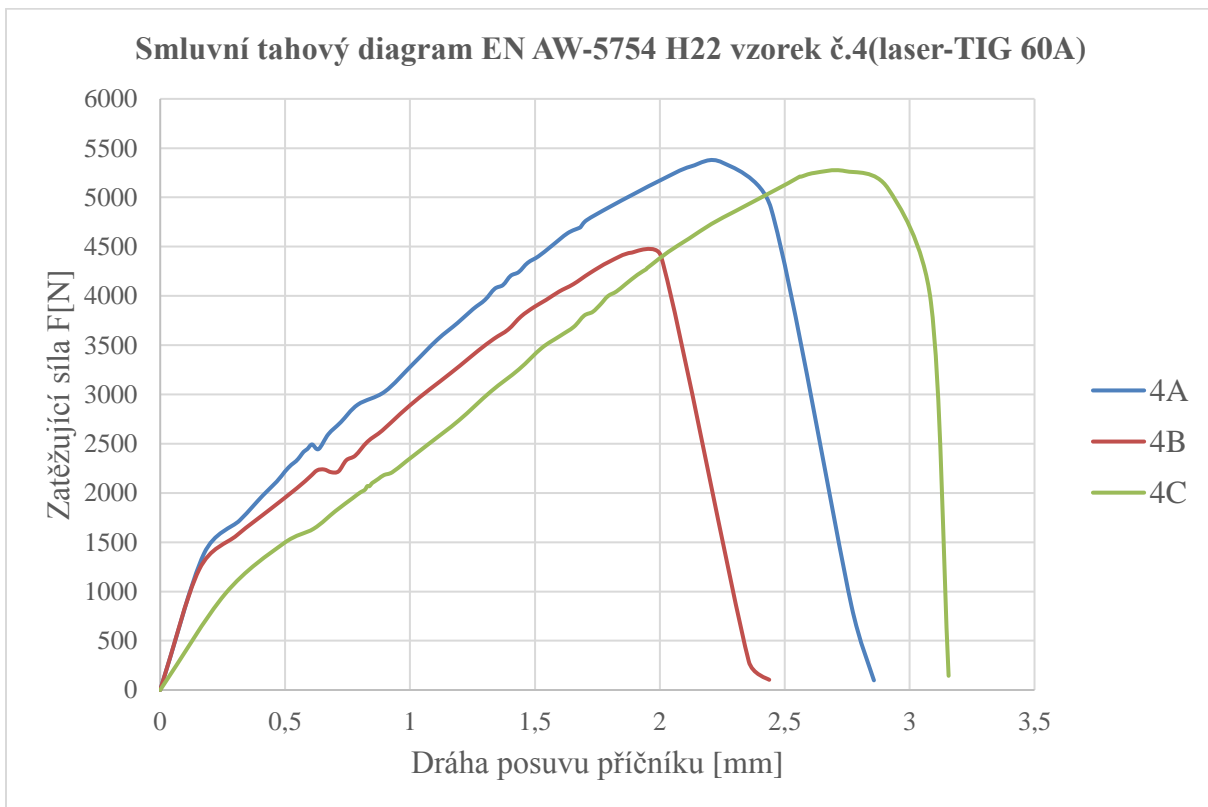
Obr. 64 Smluvní tahový diagram vzorek č.1(laser)



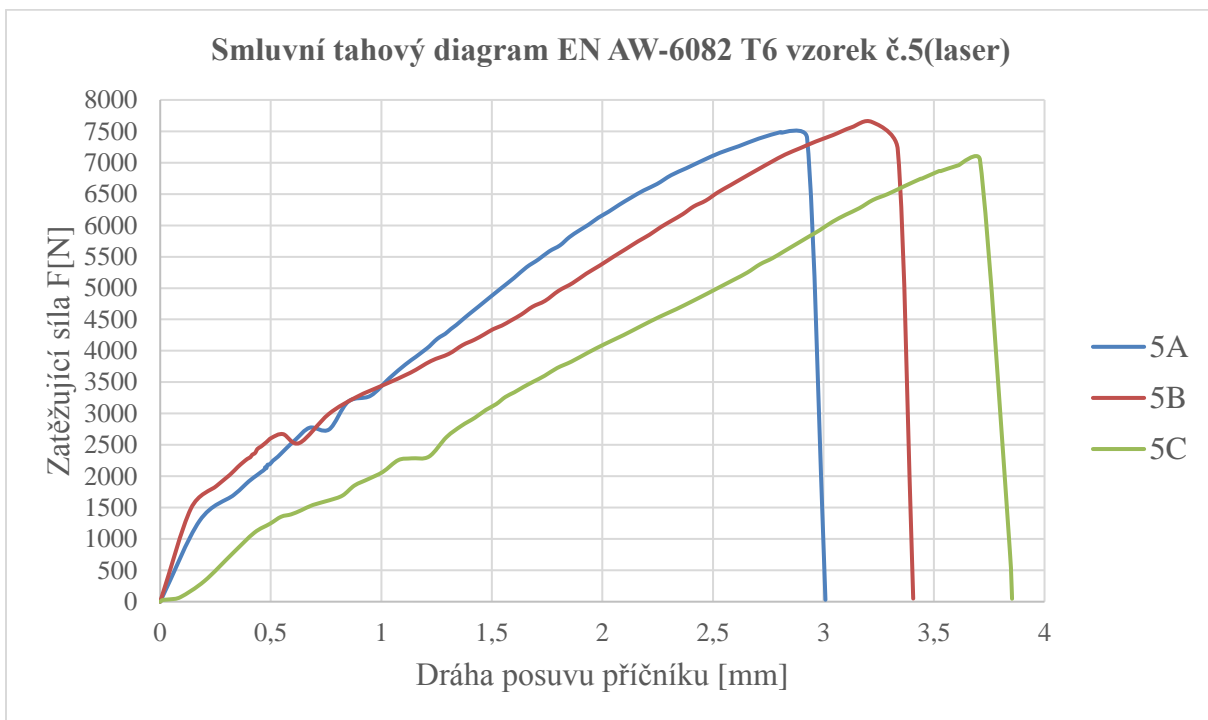
Obr. 65 Smluvní tahový diagram vzorek č.2(laser-TIG 20A)



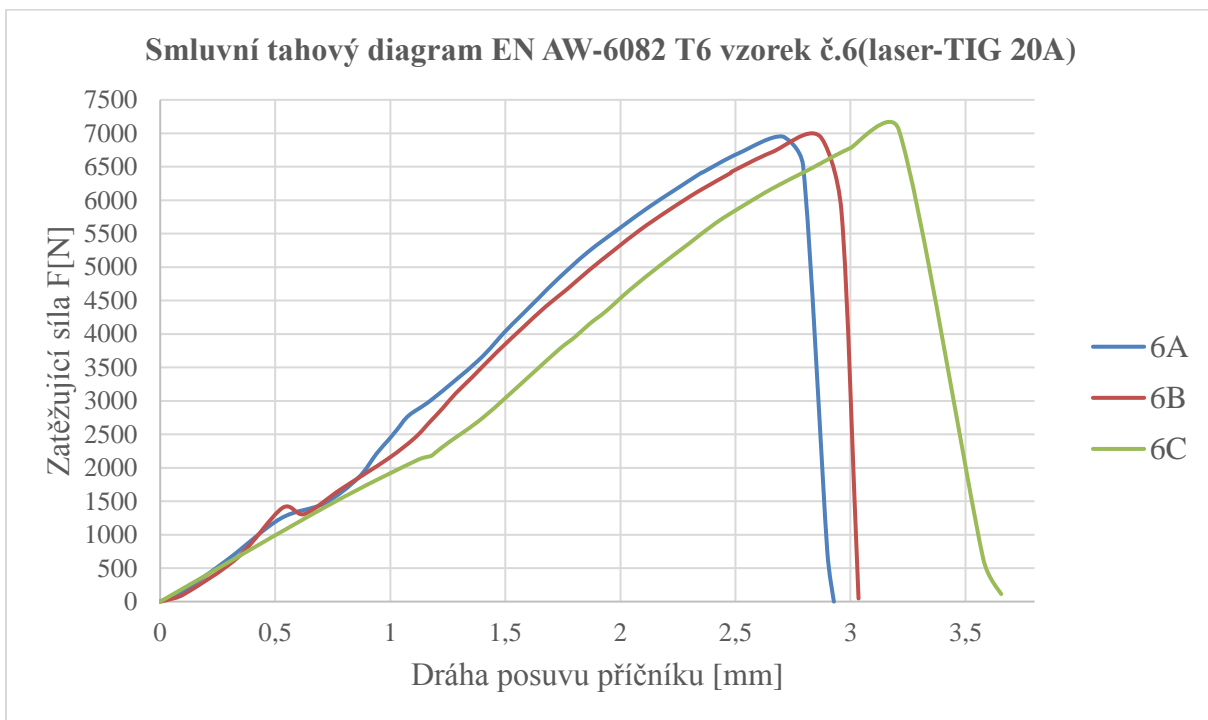
Obr. 66 Smluvní tahový diagram vzorek č.3(laser-TIG 40A)



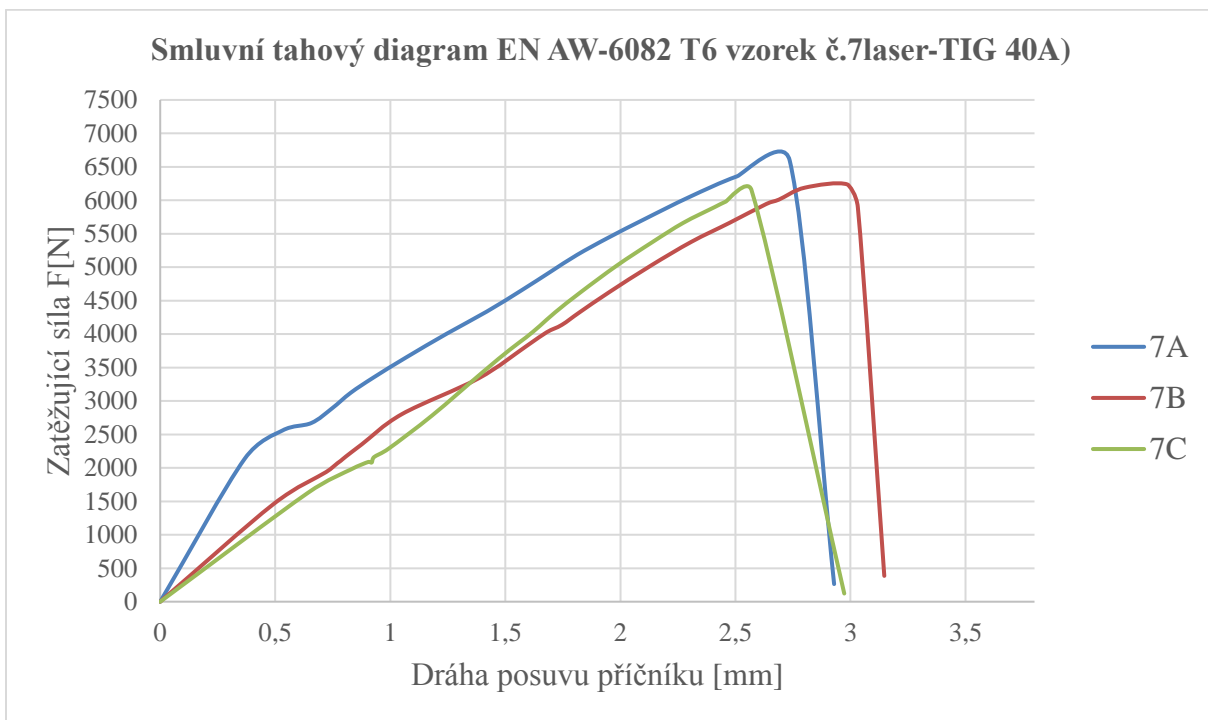
Obr. 67 Smluvní tahový diagram vzorek č.4(laser-TIG 60A)



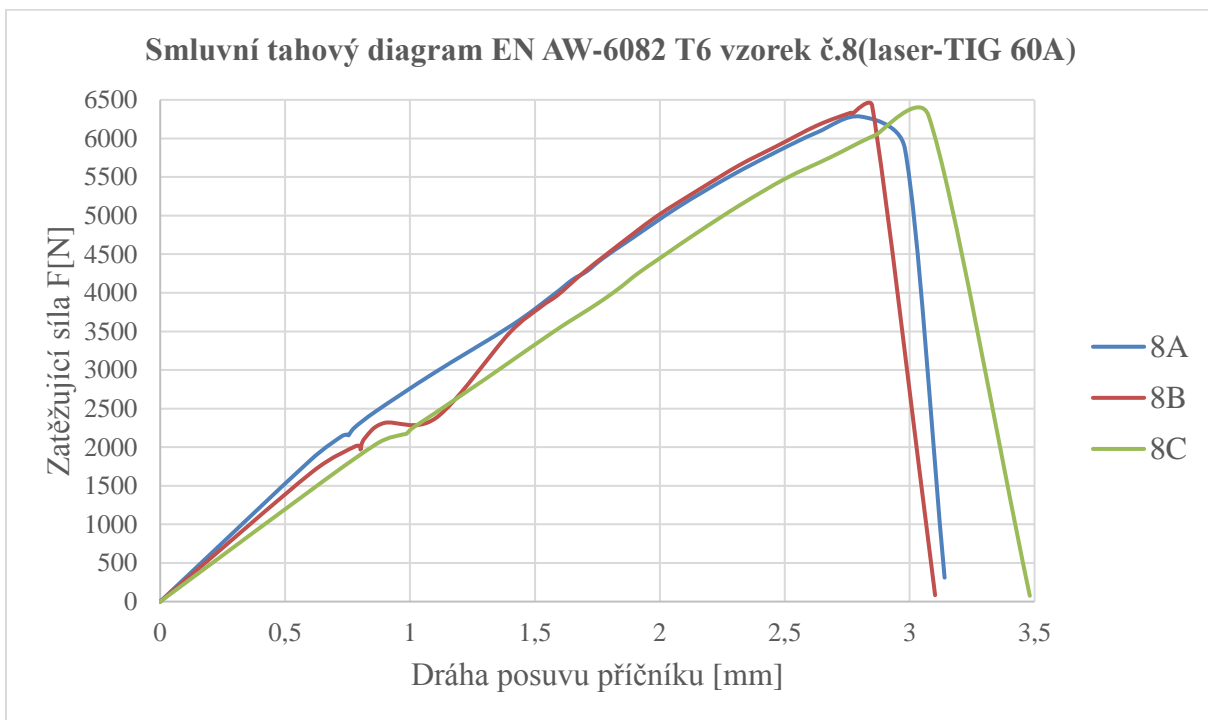
Obr. 68 Smluvní tahový diagram vzorek č.5(laser)



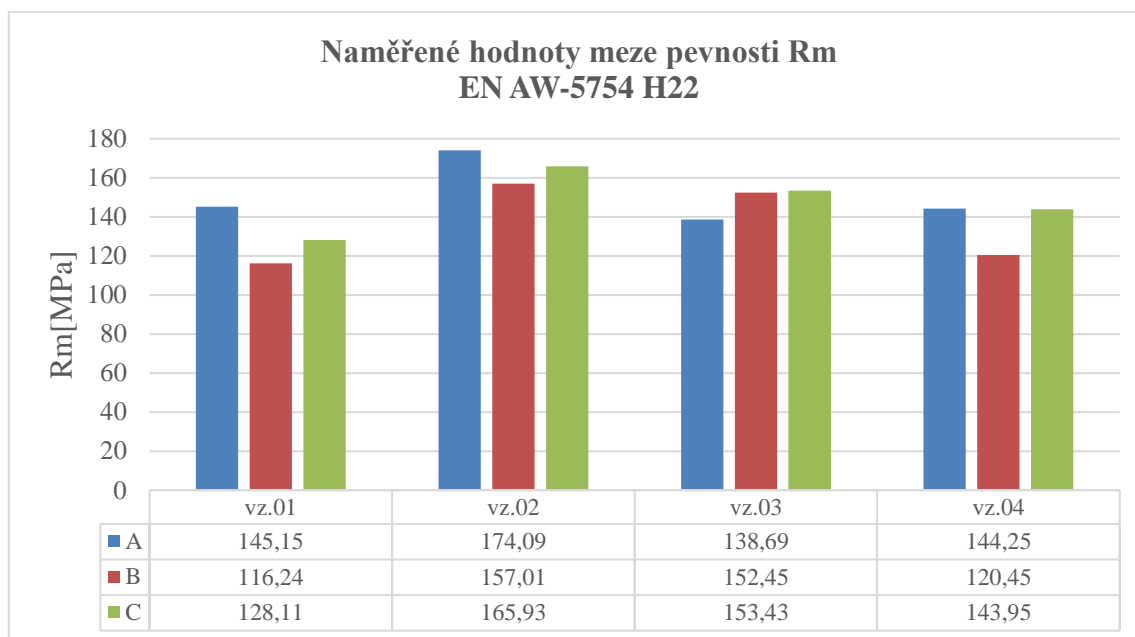
Obr. 69 Smluvní tahový diagram vzorek č.6(laser-TIG 20A)



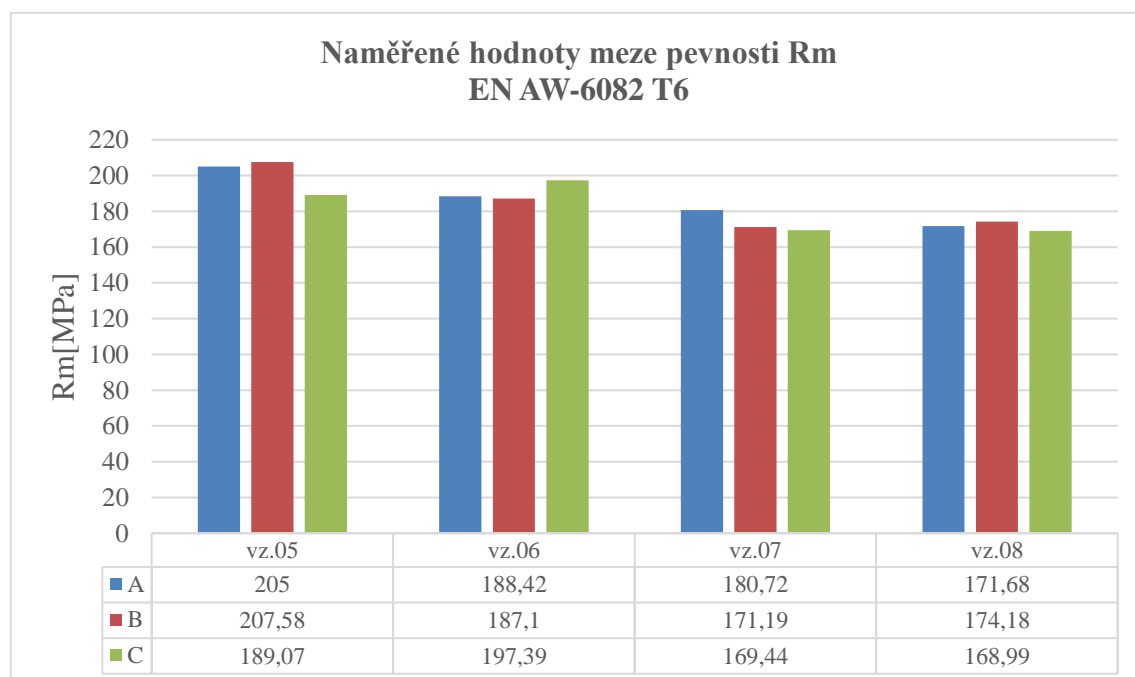
Obr. 70 Smluvní tahový diagram vzorek č.7(laser-TIG 40A)



Obr. 71 Smluvní tahový diagram vzorek č.8(laser-TIG 60A)



Obr. 72 Naměřené hodnoty meze pevnosti EN AW-5754 H22



Obr. 73 Naměřené hodnoty meze pevnosti EN AW-6082 T6

ZÁVĚRY

Cílem diplomové práce bylo osvojit si problematiku laserového svařování s využitím obloukového přehřevu. Následně provést experimentální studii závislosti procesních parametrů na kvalitě svarového spoje.

V rámci experimentu byly zkoumány dvě slitiny hliníku EN AW-5754 H22 a EN AW-6082 T6, na kterých byly vyhotoveny zkušební svary. Nejprve byly vzorky podrobeny metalografické analýze, která se zabývala zkoumáním makro a mikrostruktury. Poté byly vypočteny hodnoty vneseného tepla. Následně byly zkoumány mechanické vlastnosti pomocí zkoušky tvrdosti dle Vickerse a tahové zkoušky.

U experimentální řady slitiny EN AW-5754 H22 byl pozorován vliv vneseného tepla na geometrii svaru, zejména u kořene. Zkušební svary se vyznačovali velkým propadem kořene i líce svaru, s rostoucí hodnotou přehřevu se propadení v oblasti líce minimalizovalo. Mikroanalýza odhalila velký podíl příměsových prvků, které vedou k tvorbě intermetalických fází, avšak na žádném ze vzorků nebylo detekováno nežádoucí síťoví v přechodové oblasti. V rámci zkoušky tvrdosti dle Vickerse byly stanoveny průběhy tvrdosti napříč vzorkem. K významnému poklesu hodnot došlo v tepelně ovlivněné oblasti (dále pouze TOO). Největší hodnoty tvrdosti byly naměřeny v základním materiálu, což poukazuje na snižování tvrdosti vlivem vneseného tepla. Naměřené hodnoty tvrdosti se pohybovali v intervalu 56-80 HV_{0,2}. Na závěr experimentu byla provedena tahová zkouška. U všech měřených vzorků došlo k porušení ve svarovém kovu, což poukazuje na nedostatečné mechanické vlastnosti.

Vytvrditelná slitina EN AW-6082 T6 se vyznačovala menším propadem kořene svaru jak u výše zmíněné. Rozměry a zejména TOO se úměrně zvětšovala s hodnotou vneseného tepla. Analýza mikrostruktury detekovala téměř souvislé síťoví intermetalické fáze v přechodové oblasti, což vede k významnému poklesu houževnatosti materiálu. U vzorku č.8 (laser-TIG 60A) nebylo pozorováno souvislé síťoví, což poukazuje na kladné účinky vyšších hodnot přehřevu na TOO. Měření tvrdosti potvrdilo teoretické předpoklady řádově vyšší tvrdosti než u nevytvrditelné slitiny, byly naměřeny hodnoty v intervalu 60-102 HV_{0,2}. V přechodové oblasti dochází k rapidnímu poklesu tvrdosti až od 35 HV_{0,2}. Tahová zkouška měla stejný průběh jako u předešlé slitiny, k porušení vzorků došlo ve svarovém kovu.

Na základě výsledků experimentu, můžeme konstatovat nedostatečné mechanické vlastnosti svarových spojů. Využití obloukového přehřevu laseru je za těchto procesních parametrů neoptimální. I přes tyto fakta se domnívám, že hybridní technologie laser-TIG má svoje podstatné uplatnění. Potřebovali bychom provést rozsáhlejší výzkum, pro stanovení optimálních svařovacích parametrů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *FARLEY LASERLAB's* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://trends.directindustry.com/farley-laserlab/project-33645-155762.html>
2. *D5 Audi A8 to use multi-material space frame chassis* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://paultan.org/2017/04/06/d5-audi-a8-to-use-multi-material-space-frame-chassis/the-new-audi-a8/>
3. *Hliníkové díly v automobilovém průmyslu* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.desyen.cz/hlinikove-dily-v-automobilovem-prumyslu/>
4. *Hliník v dopravě* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.hlinik.info/clanky/hlinik-v-doprav-e>
5. *Aluminium v automobilové branži* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/jine-info-zajimavosti/6407,aluminium-v-automobilove-branzi>
6. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
7. *Advances in Self-Piercing Riveting* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/94431-advances-in-self-piercing-riveting>
8. *Nýtování* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1875>
9. *Metody spojování využívající principy plastické deformace* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-spojovani-vyuzivajici-principy-plasticke-deformace.html>
10. *Self-pierce riveting systems for perfect joints* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.boellhoff.com/de-en/products-and-services/assembly-technology/self-pierce-riveting-rivset.php>
11. *Lepení kovů* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/lepeni-kovu.html>
12. *Technologie a technika lepení - základní informace* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
13. *Automotive adhesives get tough* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/assembly/automotive-adhesives-get-tough>
14. *Friction Stir Welding Technology: Part One* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=ktn&NM=190>
15. *Friction Stir Welding Expands Its Reach* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/94007-friction-stir-welding-expands-its-reach>
16. *MIG nebo MAG? Jaký je rozdíl?* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101501>
17. *MIG/MAG (CO2)* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
18. *TIG svařování I - základní principy*. [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
19. *Welding Engineering Construction* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.pembrokeshire.ac.uk/courses/welding-engineering-construction-pipework/>
20. *How a TIG Welder Works and When to TIG Weld* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tig-it-how-a-tig-welder-works-and-when-to-tig-weld>

-
21. *Penta Laser Welding Machine Applied In Automobile Industry* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
https://www.pentachutian.com/en/wap/NewsView.aspx?ch_id=2&ca_id=37&id=82
 22. Diskový laser. *TRUMPF* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/
 23. Hluboké svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hlubokey-svarovani/
 24. Kondukční svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcnisvarovani/
 25. Kontinuální vláknový laser. *LINTECH* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.lintech.cz/kontinualni-vlaknovy-laser>
 26. Laserové svařování. *LINTECH* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.lintech.cz/laserove-svarovani>
 27. Laserové svařování. *LaserTherm* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
 28. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ. *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86/laserove-svarovani-kovovych-materialu-88>
 29. Nd:YAG laser [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: http://lasery.wz.cz/nd-yag_laser.html
 30. Nekonenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil.html>
 31. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ a Karel NĚMEC. Neželezné kovy a jejich slitiny I [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf
 32. Polovodičové (diodové) lasery [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
http://lasery.wz.cz/polovodicove_lasery.html
 33. Poslední trendy ve svařování laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem.html>
 34. PRŮMYSLOVÉ LASERY. *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laserove-roboticke-systemy--691k/prumyslove-lasery-748k>
 35. Rozdělení laserů. *LASCAM systems* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
 36. HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
 37. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
 38. ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *LAO - Lasery a optika* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
-

-
39. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser [online]. In: . [cit. 2019-05-24].
Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_lasere_m_2013__mrna.pdf
 40. Vláknové mřížky a rezonátory. NETWORK GROUP [online]. [cit. 2019-05-24].
Dostupné z: <http://sfo.networkgroup.cz/cs/vlaknove-mrizky-a-rezonatory/>
 41. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky [online]. In: . [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
 42. Mezníky technologie TIG AC/DC pro svařování hliníku. Automig [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://automig.cz/fileadmin/pub/doc/pdf/V%C3%BDvoj%20TIG%20ACDC%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
 43. Svařování slabých plechů. KONSTRUKCE [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-slabych-plechu/>
 44. Svařování TIG. Alfin-Trading [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.alfin-trading.cz/clanek/svarovani-tig/1>
 45. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. Technologie svařování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
 46. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
 47. TIG (WIG). Automig [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatic/>
 48. TIG svařování I. SVARBAZAR [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
 49. TIG svařování II. SVARBAZAR [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008122801>
 50. TIG/WIG svařování. FRONIUS [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-48E32D67-70A72504/fronius_ceska_republika/hs.xml/29_3920.htm#.WSVONevyjDe
 51. ZHOU, J. a H.L. TSAI. Hrbrid Laser-Arc Welding. *Welding Processes* [online]. InTech, 2012 [cit. 2019-05-24]. DOI: 10.5772/50113. ISBN 978-953-51-0854-2.
Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/welding-processes/hrbrid-laser-arc-welding>
 52. ED. BY FLEMMING OVE OLSEN. *Hybrid laser-arc welding*. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press [u.a.], 2009. ISBN 978-143-9802-144.
 53. KESSE, Martin Appiah. *Laser-TIG hybrid welding process* [online]. 2013 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2>
 54. AUTORŮ, kolektiv. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2
 55. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. CWS-ANB [online]. [cit. 2019-05-24].
Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
 56. *Metrologie ve strojírenství* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>
 57. *Tvrđost* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.merenitvrđosti.cz/tvrđost.html>
 58. *Měření tvrđosti* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z:
<http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/36-mereni-tvrđosti.html>
-

-
59. *Kontrola kvality* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.sea.cz/cs/reference/fotogalerie/transportni-civky-a-palety/kontrola-kvality/#prettyPhoto>
 60. *Hardness-Testing Machine Shopping Tips* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/93000-hardness-testing-machine-shopping-tips?v=preview>
 61. *ČSN EN ISO 4136 (051121) A Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
 62. MACHEK, Václav. *[Nauka o materiálu]*. 2. část, Vlastnosti kovových materiálů. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0. Skripta. České vysoké učení technické v Praze.

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 na montážní lince.
- Obr. 2 Karosérie Audi A8
- Obr. 3 Nýtovací metoda Self-piercing.
- Obr. 4 Technologie lepení
- Obr. 5 Svařovací metoda FSW
- Obr. 6 Svařovací metoda MIG
- Obr. 7 Svařovací metoda TIG
- Obr. 8 Laserová svařování karosérie.
- Obr. 9 Porovnání elektromagnetický záření zdroje světla.
- Obr. 10 Princip Nd: YAG laseru.
- Obr. 11 Princip diskového laseru.
- Obr. 12 Princip vláknového laseru.
- Obr. 13 Princip CO₂ laseru.
- Obr. 14 Princip diodového laseru.
- 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
- 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 hybridní soustavy a)TIG předehřev b)TIG dohřev.
- Obr. 23 Závislost výkonu el. oblouku na hloubce průvaru.
- Obr. 24 Závislost svařovací rychlosti na rozměrech svaru.
- Obr. 25 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru.
- Obr. 26 Závislost pozice ohniska na hloubce průvaru s konstantním a)proudem b)rychlostí.
- Obr. 27 Schématické znázornění pracovních úhlu během metody TIG.
- Obr.28 Typy vad ve svarech.
- Obr. 29 Rozpustnost vodíku v hliníku.
- Obr. 30 Svarové vady
- Obr. 31 Magnetická zkouška svaru
- Obr. 32 Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse.
- Obr. 33 Plochá zkušební tyč
-

Obr. 34 Svařovací aparatura
Obr. 35 Upnutí svařovaných vzorků
Obr. 36 Svařený vzorek č.1 – vrchní (vlevo) a spodní strana zkušebního svaru (vpravo)
Obr. 37 Vedení řezu vzorkem
Obr. 38 Laboratorní pila Mikron 110
Obr. 38 Metalografická bruska/leštička Struers Tegramin-20
Obr. 39 Ultrazvuková pračka Ulsonix
Obr. 40 Mikroskop Olympus SC50
Obr. 41 Vzorek č.1 EN AW-5754 H22 (laser)
Obr. 42 Vzorek č.4 EN AW-5754 H22 (laser-TIG 60A)
Obr. 43 Vzorek č.5 EN AW-6082 T6 (laser)
Obr. 44 Vzorek č.8 EN AW-6082 T6 (laser-TIG 60A)
Obr. 46 Chemická mikroanalýza vzorek č.5 (laser)
Obr. 47 Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.5 (laser)
Obr. 48 Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)
Obr. 49 Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)
Obr. 50 Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.2 (laser-TIG 20A)
Obr. 51 Graf závislosti vneseného tepla na ploše svaru
Obr. 52 Tvrdoměr Zwick 3212
Obr. 53 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.1 (laser)
Obr. 54 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.2 (laser-TIG 20A)
Obr. 55 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.3 (laser-TIG 40A)
Obr. 56 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.4 (laser-TIG 60A)
Obr. 57 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.5 (laser)
Obr. 58 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.4 (laser-TIG 60A)
Obr. 59 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.7 (laser-TIG 40A)
Obr. 60 Průběh tvrdosti dle Vickerse vzorek č.8 (laser-TIG 60A)
Obr.61 Upnutí zkušební tělesa
Obr.62 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku
Obr. 62 Zkušební vzorky po tahové zkoušce č.1 až č.4. (EN AW-5754 H22)
Obr. 63 Zkušební vzorky po tahové zkoušce č.5 až č.8. (EN AW-6082 T6)
Obr. 64 Smluvní tahový diagram vzorek č.1(laser)
Obr. 65 Smluvní tahový diagram vzorek č.2(laser-TIG 20A)
Obr. 66 Smluvní tahový diagram vzorek č.3(laser-TIG 40A)
Obr. 67 Smluvní tahový diagram vzorek č.4(laser-TIG 60A)
Obr. 68 Smluvní tahový diagram vzorek č.5(laser)

-
- Obr. 69 Smluvní tahový diagram vzorek č.6(laser-TIG 20A)
Obr. 70 Smluvní tahový diagram vzorek č.7(laser-TIG 40A)
Obr. 71 Smluvní tahový diagram vzorek č.8(laser-TIG 60A)
Obr. 72 Naměřené hodnoty meze pevnosti EN AW-5754 H22
Obr. 73 Naměřené hodnoty meze pevnosti EN AW-6082 T6

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 Chemické složení EN AW-5754 H22

Tab. 5 Mechanické vlastnosti EN AW-5754 H22

Tab. 6 Chemické složení EN AW-6082 T6

Tab. 7 Mechanické vlastnosti EN AW-6082 T6

Tab. 8 Velikost přehřevu

Tab. 9 Konstantní procesní parametry hybridního svařování laser-TIG

Tab.10 Vypočítané hodnoty vneseného tepla

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 - Materiálový list slitiny hliníku: EN AW-5754 H22

Příloha č.2 - Materiálový list slitiny hliníku: EN AW-6082 T6

Příloha č.3 – Svařovací sestava s popisem

Příloha č.4 – Hydraulický zkušební stroj ZD40

Příloha č.5 – Snímky makrostruktury – EN AW-5754 H22

Příloha č.6 – Snímky makrostruktury – EN AW-6082 T6

Příloha č.7 – Snímky mikrostruktury přechodové oblasti – EN AW-5754 H22

Příloha č.8 – Snímky mikrostruktury přechodové oblasti – EN AW-6082 T6

Příloha č.9 – Sloupcový graf naměřených hodnot makrostruktury

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

Abnahmeprüfzeugnis DIN EN 10204 3.1
 Prüfzeugnis Nr.0000964162/ 001
 Seite 1 / 1

**Hydro Aluminium
 Rolled Products**



Werk Hamburg

Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Aluminiumstraße, D-21129 Hamburg Alumeo Service GmbH Haide Feld 1 D-06869 COSWIG	Packlisten-Nr./Position	1450468069 000010
	Auftrags-Nr./Pos./Kunde-Nr.	851818/ 000160/ 129619
	Kundenbestell-Nr.	120418059 consignment stock
	Material-Nr.	85923435
	Legierung	5754
	Zustand	H22
Abmessungen (D x B)		3,000 x 1250,00 mm

Prüfgrundlage DIN EN 485-1+ 2+ 4 , DIN EN 515 , DIN EN 573-3	Vertriebstext 6003209 RID 500 mm - RAD. ca. 1800 mm Achse waagrecht Dickentol.: 1/2 EN, nur im Minus Art.1100143
--	--

Chargen Rückverfolgung

Herkunft	Packstück-Nr.	Gusscharge	Prüfpunkt	Master ID	Gewicht [kg]	Stückzahl
6388050101	H360053101	3808731042018	6388050101	63880501	7.375	1

Prüfergebnisse

Prüfpunkt	Messwerte									
	Dicke mm	Rm MPa	Rp0,2 MPa	A50 %						
min.	2.850	220	130	10,0						
max.	3.000	270								
6388050101	2.908	235	182	13.5						

Chemische Zusammensetzung (Gew.%) der Gusscharge(n)

Gusscharge	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mn+ Cr %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %
min.	-	-	-	-	0.10	2.6	-	-	-
max.	0.40	0.40	0.10	0.50	0.6	3.6	0.30	0.20	0.15
380873104 2018	0.26	0.37	0.05	0.26	0.31	2.9	0.05	0.05	0.03

QM-System zertifiziert nach ISO/TS 16949 ISO 9001 & ISO 14001 & EN 50001 Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei Bestellannahme entspricht. Das Zeugnis wurde maschinell erstellt.			Abnahmebeauftragter	A. Witz
			Zeichen	WAH2
			Werk	Hamburg
			Ausstellungsort	Hamburg 17.09.2018

Příloha č.2 - Materiálový list slitiny hliníku: EN AW-6082 T6

Inspection certificate No. **183062AT**
EN 10204/3.1

Dodavatel (Supplier): Alcom Alval s.r.o. Komerční 531 251 01 Nupaky 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): BPL003006082T6 tl. 3,00 mm; PLECH; EN AW-6082 T6; EN 573-3, EN-485-1+A1,-2,-4; AISi1MgMn; kalený	
Rozměr (Dimension) [mm]: 1000x2000 mm	
Množství (Quantity): 1,00 ks	

Kupní smlouva (Contract): KS 1816091
 Objednávka (Purchase order): OV18-2622
 Dodací list (Shipping document): DLV 1809434
 Originální atest (OIC No.): 89107096 01/1
 Ze dne (Date): 11.9.2018
 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) [%]	Tvrdość HB (Hardness)
57459/01	01/0090614/8	343-345	294-296	A50=14-16	-

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)	0,9	0,37	0,07	0,42	0,8	0,02	0,08	0,02	-

Poznámka (Note): -

Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

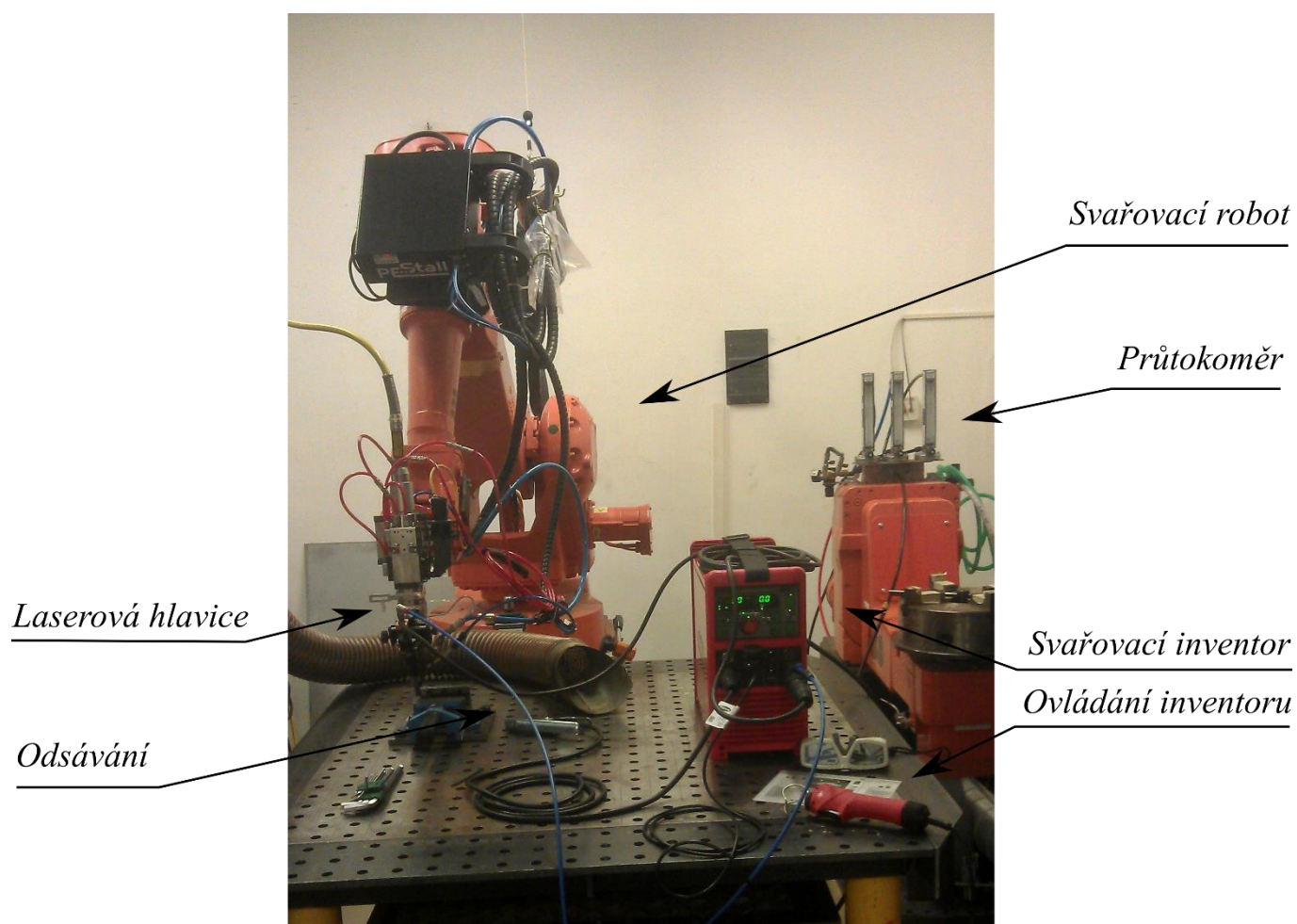
Razítko: 

Ivan Vodák
IČ: 25352822
DIČ: CZ25352822

Alcom Alval s.r.o.
Komerční 531
251 01 Praha-Nupaky



Příloha č.3 – Svařovací sestava s popisem



Příloha č.4 – Hydraulický zkušební stroj ZD40

Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

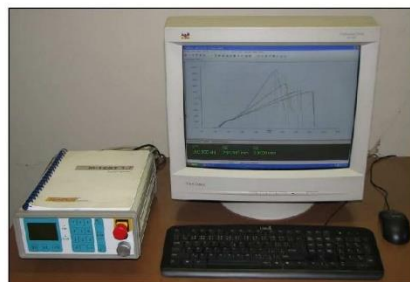
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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

Technické parametry:

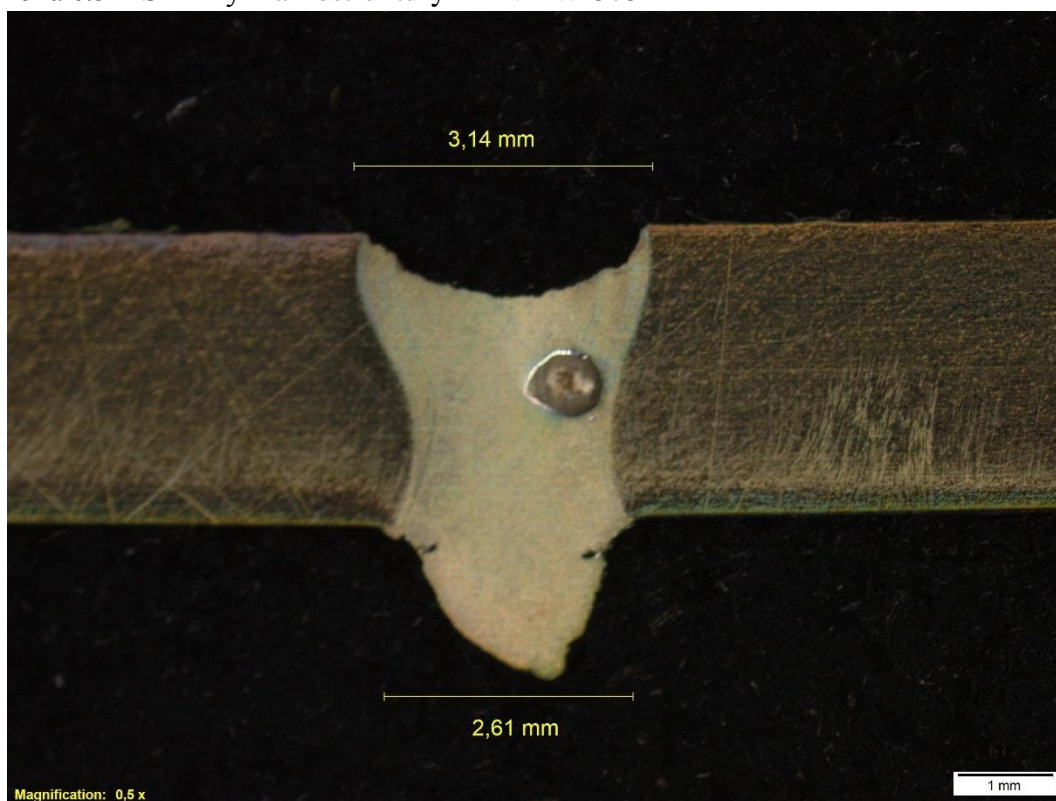
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální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

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.

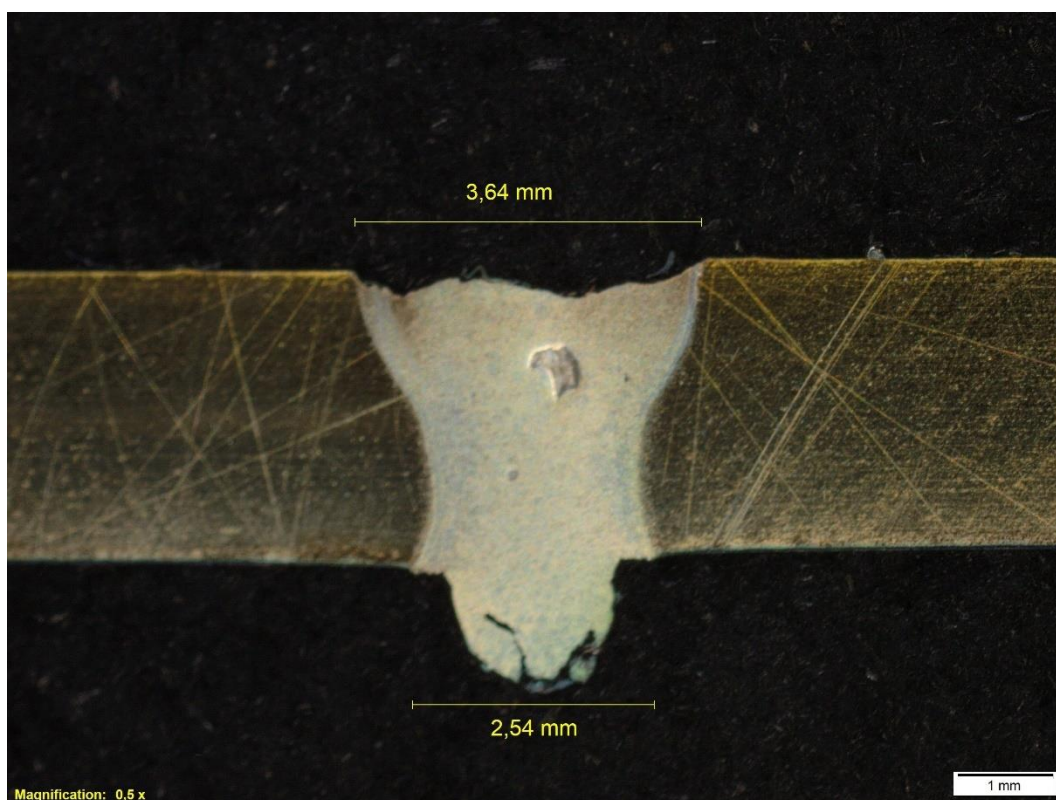


Řídicí jednotka EDC 60

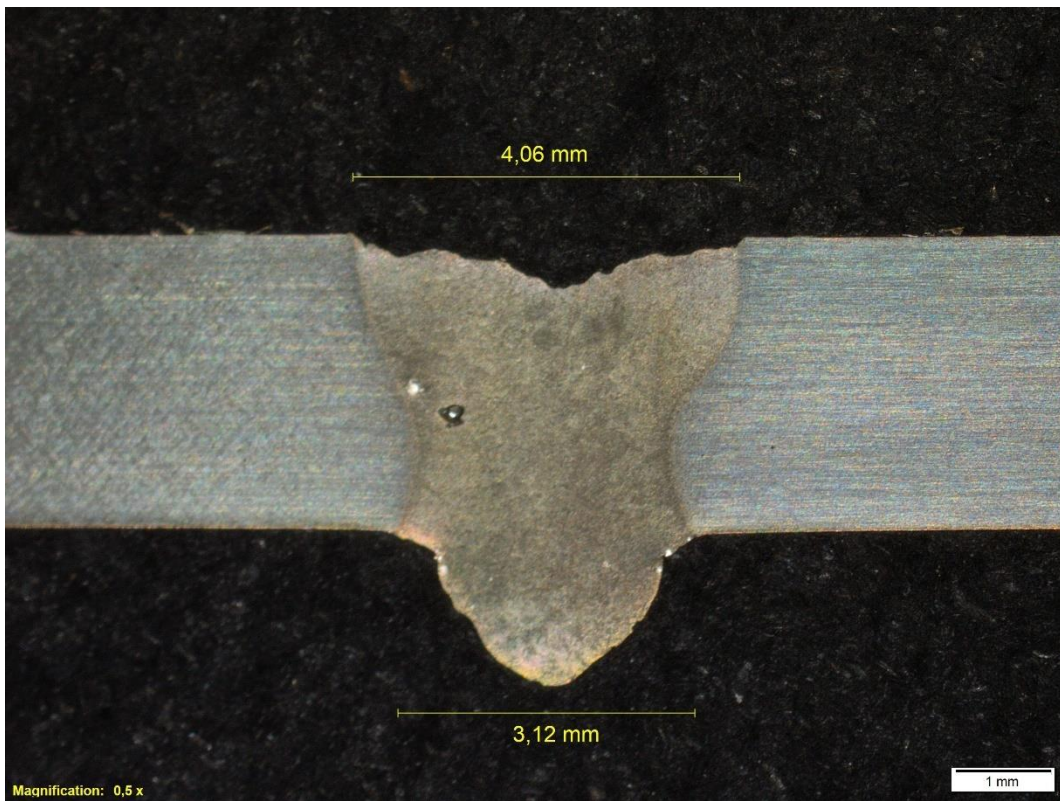
Příloha č.5 – Snímky makrostruktury – EN AW-5754 H22



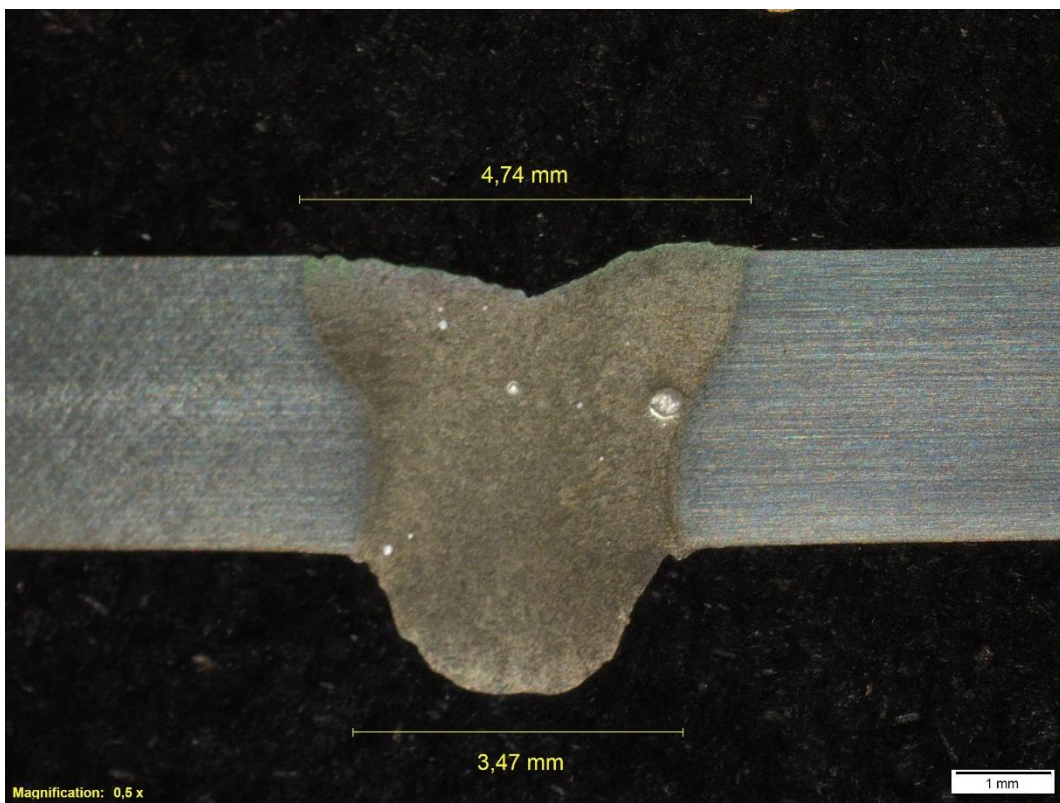
Vzorek č.1 EN AW-5754 H22 (laser)



Vzorek č.2 EN AW-5754 H22 (laser-TIG 20A)

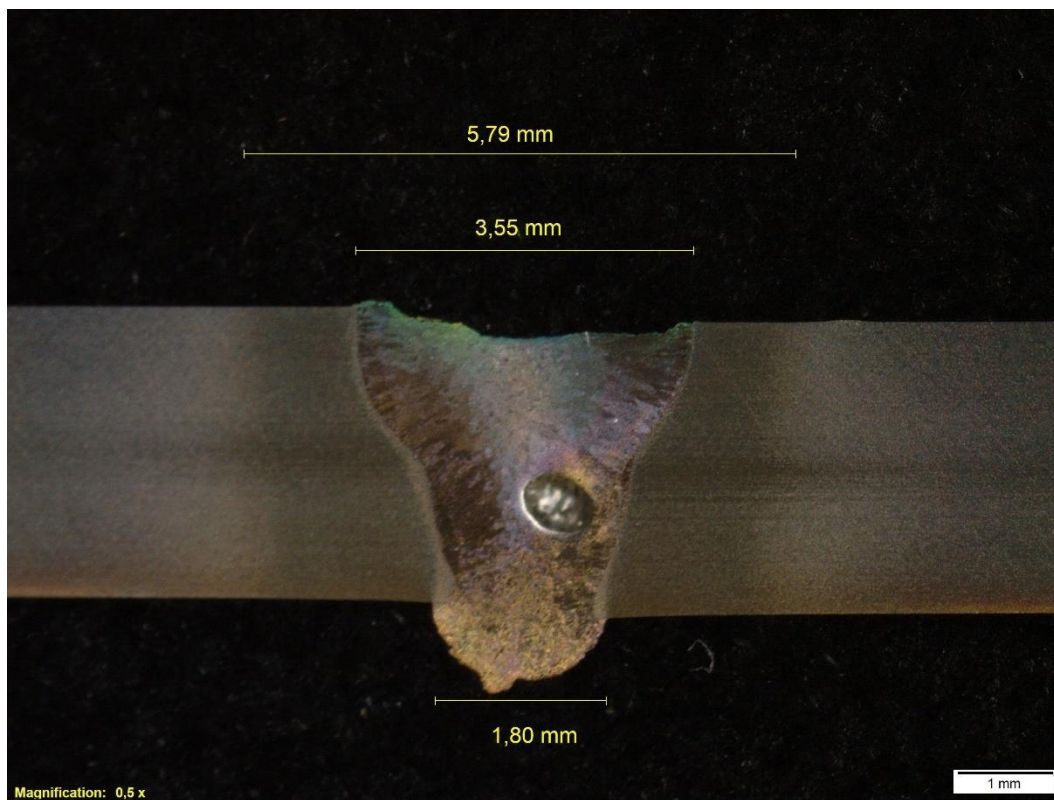


Vzorek č.3 EN AW-5754 H22 (laser-TIG 40A)

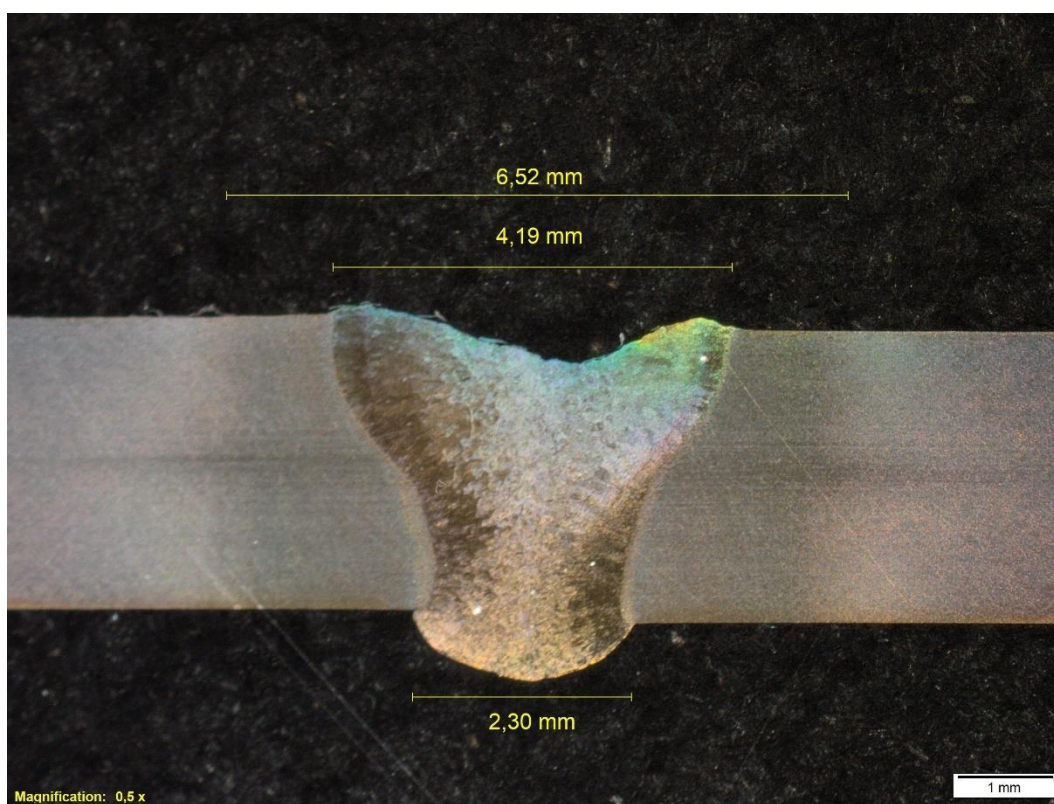


Vzorek č.4 EN AW-5754 H22 (laser-TIG 60A)

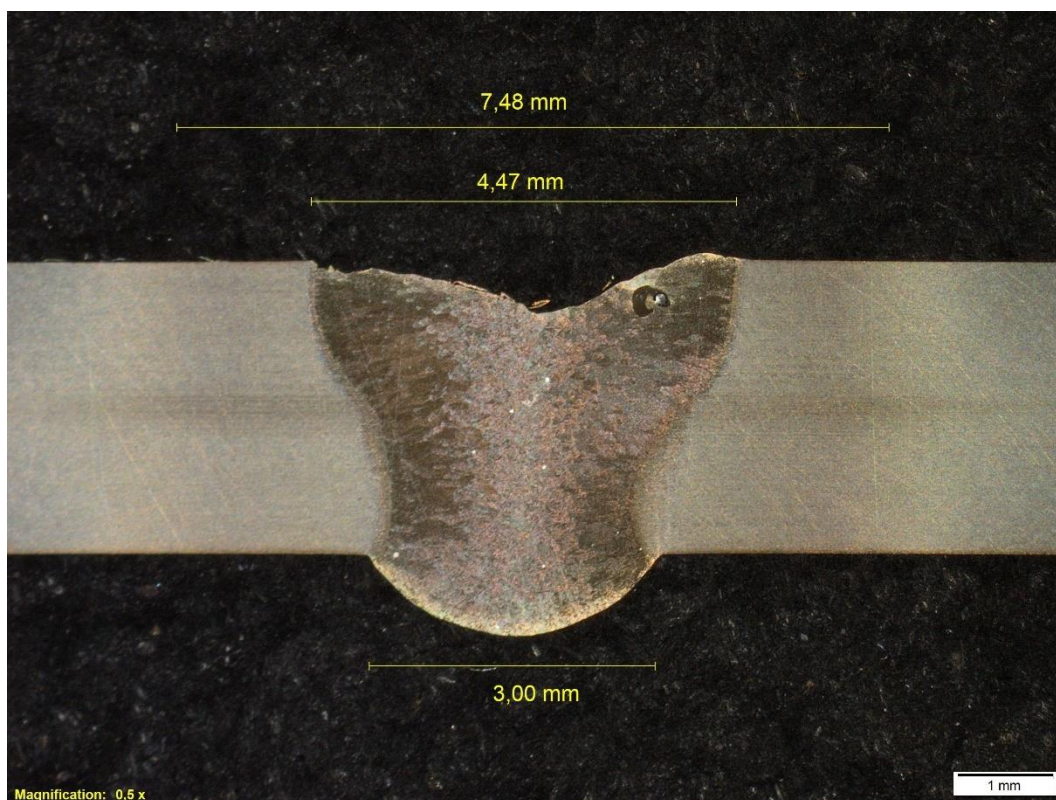
Příloha č.6 – Snímky makrostruktury – EN AW-6082 T6



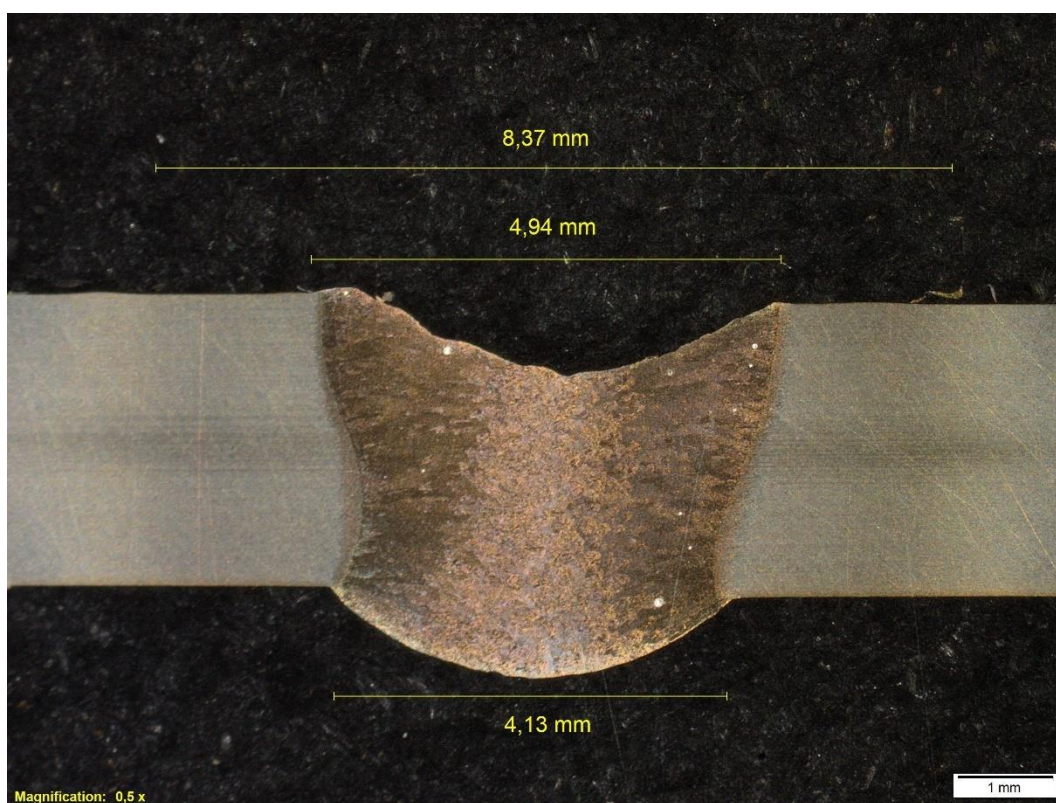
Vzorek č.5 EN AW-6082 T6 (laser)



Vzorek č.6 EN AW-6082 T6 (laser-TIG 20A)



Vzorek č.7 EN AW-6082 T6 (laser-TIG 40A)

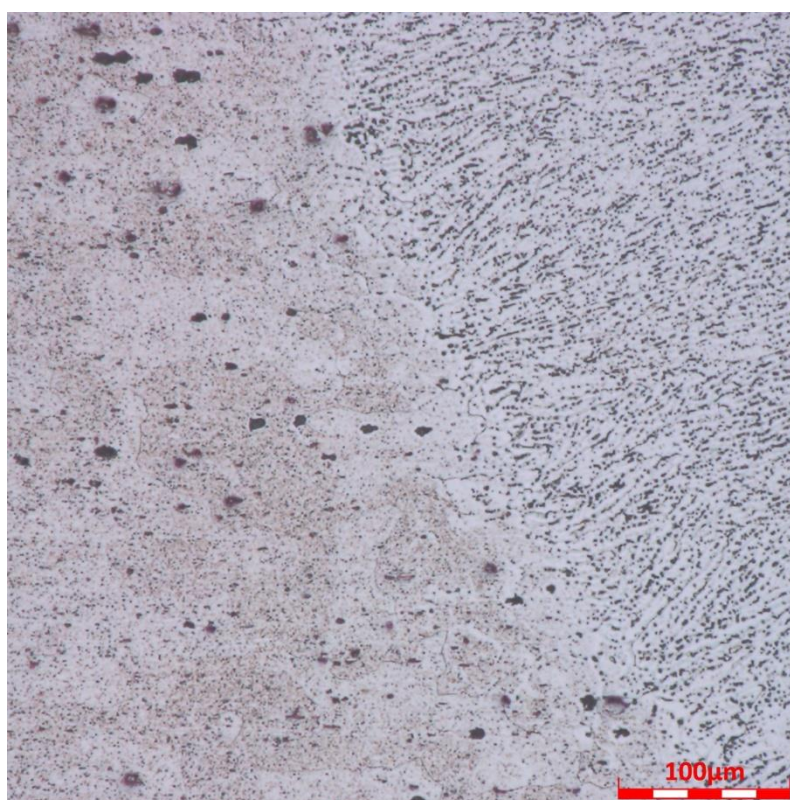


Vzorek č.8 EN AW-6082 T6 (laser-TIG 60A)

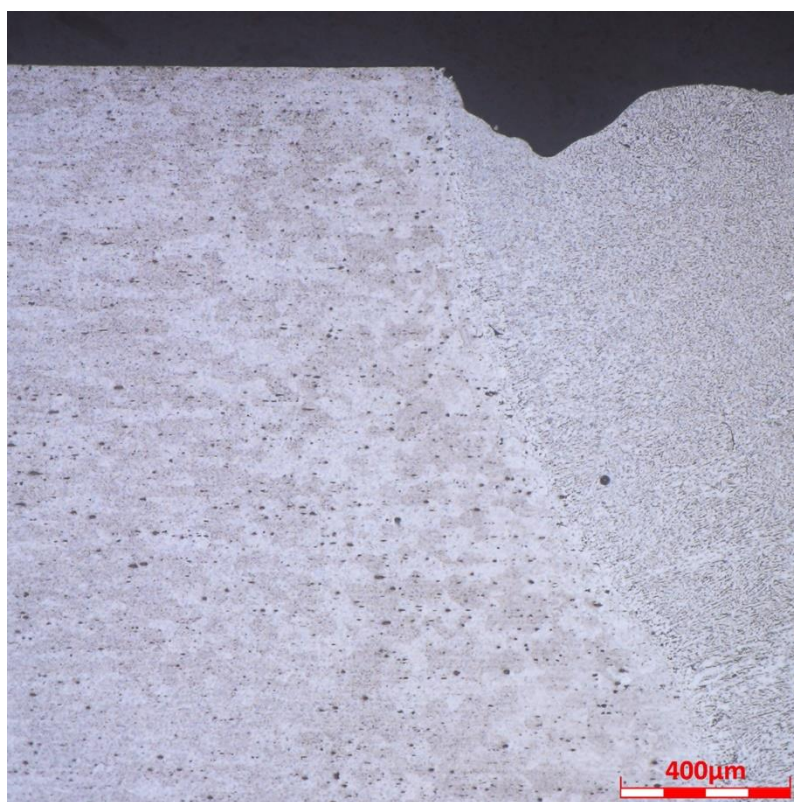
Příloha č.7 – Snímky mikrostruktury přechodové oblasti – EN AW-5754 H22



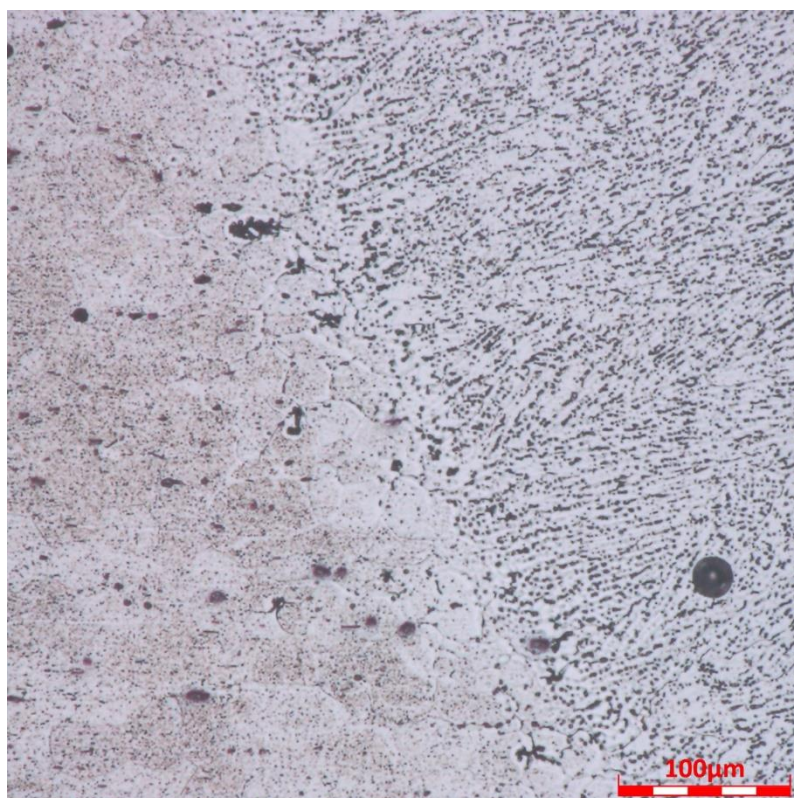
Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.1 (laser)



Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.1 (laser)



Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.2 (laser-TIG 20A)



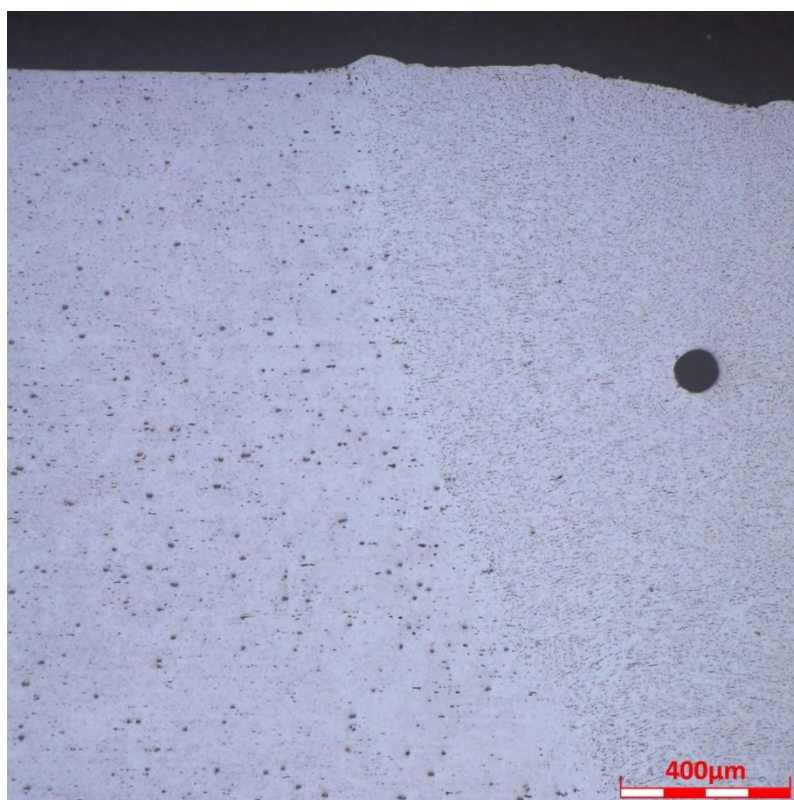
Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.2 (laser-TIG 20A)



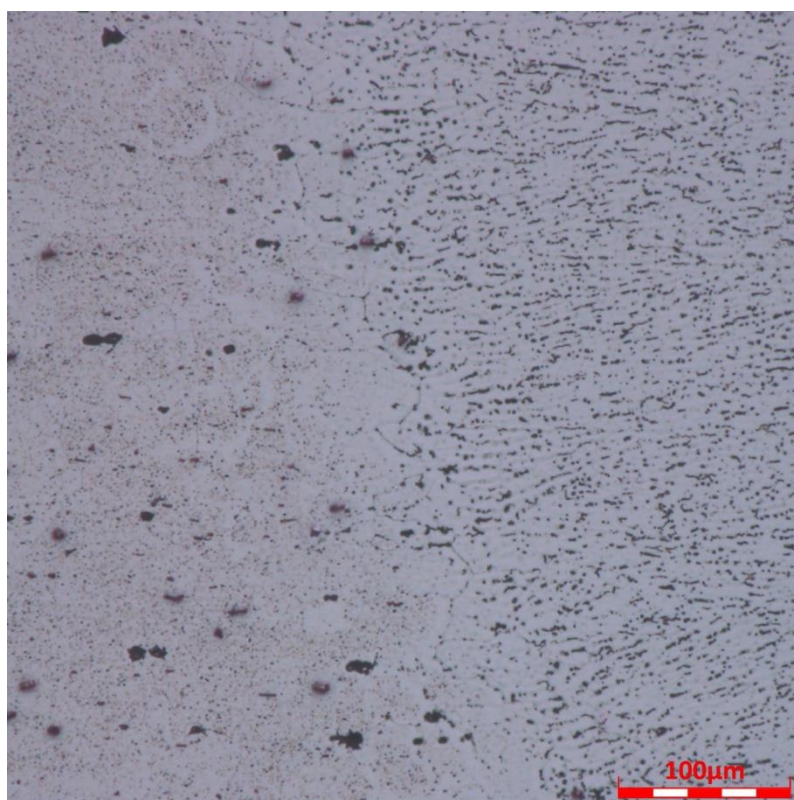
Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.3 (laser-TIG 40A)



Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.3 (laser-TIG 40A)



Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.4 (laser-TIG 60A)

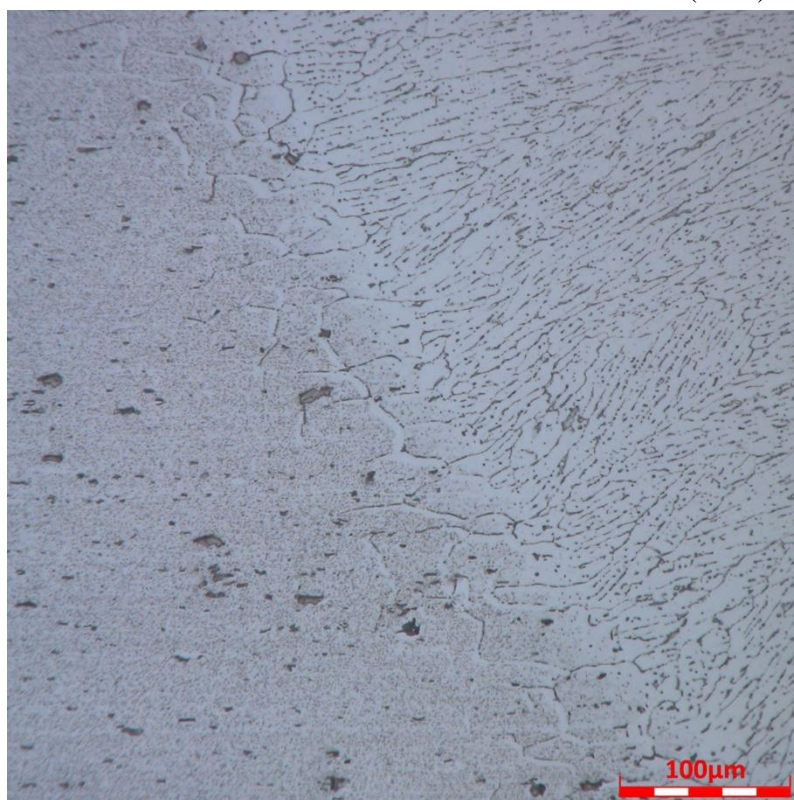


Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.4 (laser-TIG 60A)

Příloha č.8 – Snímky mikrostruktury přechodové oblasti – EN AW-6082 T6



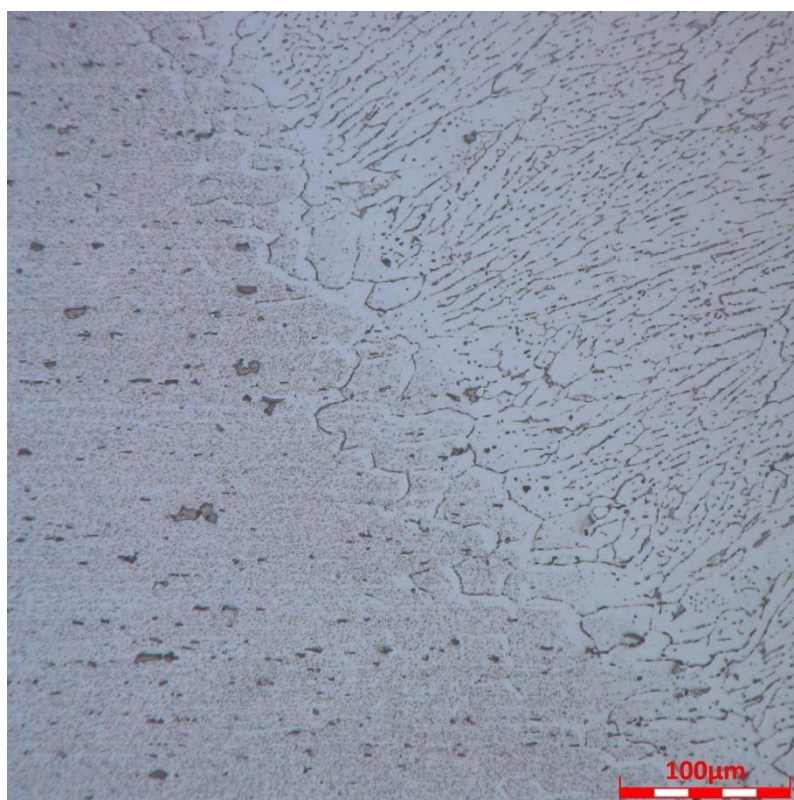
Rozhraní svarového kovu a T6O – vzorek č.5 (laser)



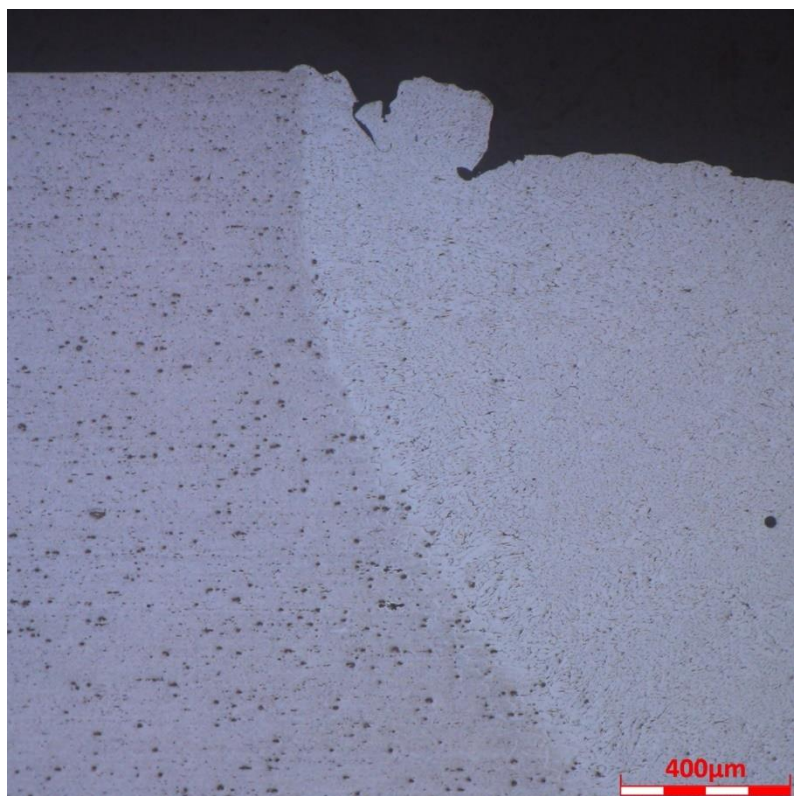
Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.5 (laser)



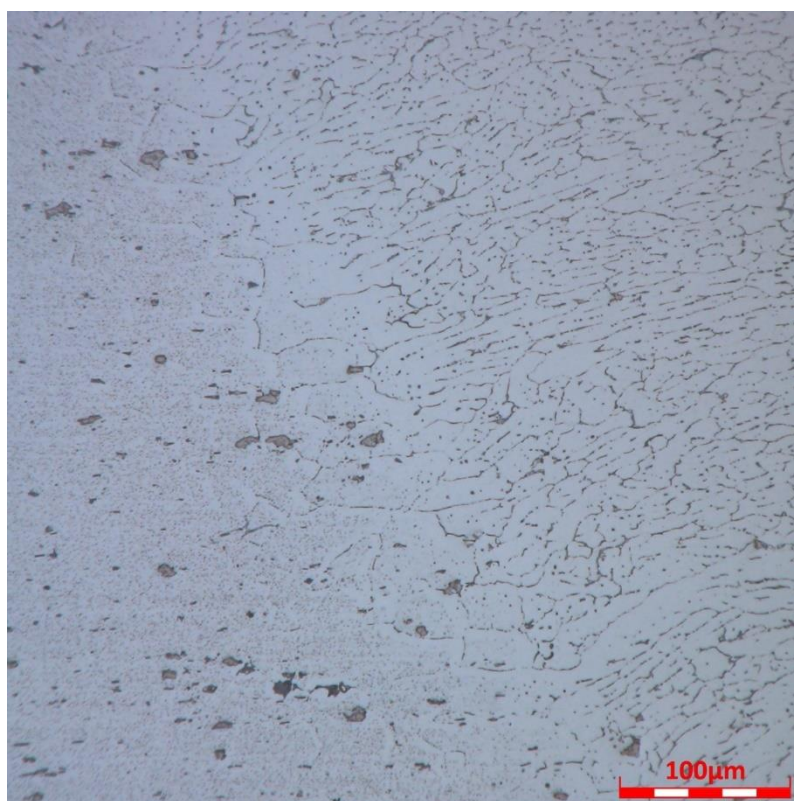
Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.6 (laser-TIG 20A)



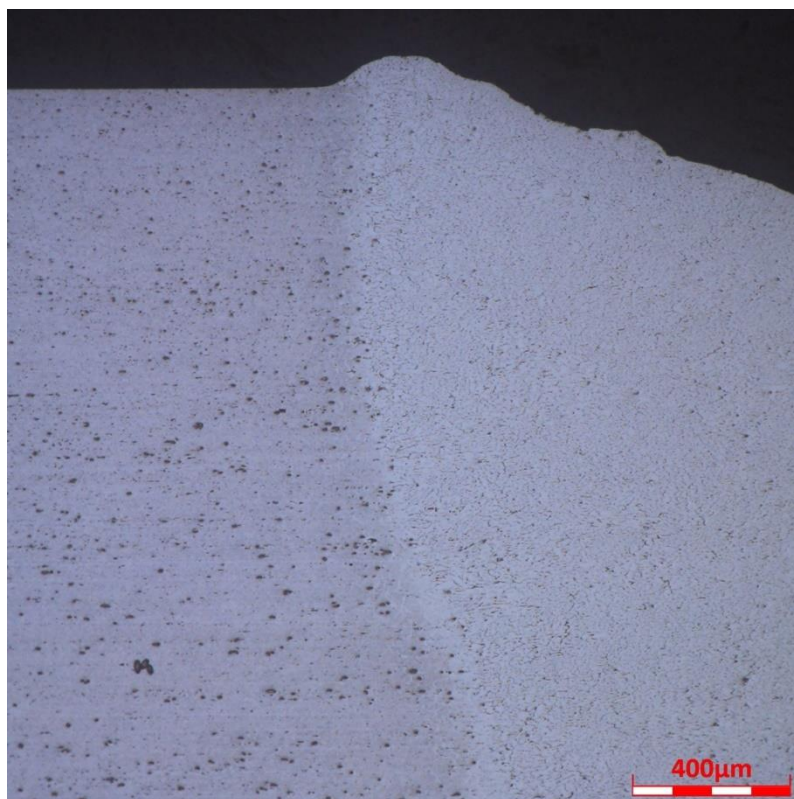
Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.6 (laser-TIG 20A)



Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.7 (laser-TIG 40A)



Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.7 (laser-TIG 40A)



Obr. XX Rozhraní svarového kovu a TOO – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)



Obr. XX Detail struktury přechodové oblasti – vzorek č.8 (laser-TIG 60A)

Příloha č.9 – Sloupcový graf naměřených hodnot makrostruktury.

