

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## Laserové svařování slitin mědi



Autor:	Jiří Hůsek
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R030 Přístrojová fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Hana Chmelíčková
Termín odevzdání práce:	červen 2019

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Hany Chmelíčkové a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci .....

.....

Hůsek Jiří

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora	Jiří Hůsek
Název práce	Laserové svařování slitin mědi
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR
Vedoucí práce	RNDr. Hana Chmelíčková
Rok obhajoby práce	2019
Abstrakt	Tato práce se věnuje konvenčním metodám svařování mědi a jejích slitin, dále laserovým technologiím a moderním metodám, které se využívají při svařování mědi a jejích slitin laserem. Součástí práce je realizace ukázky vybraných metod svařování pomocí laseru a zhodnocení výsledků.
Klíčová slova	Svařování mědi, moderní laserové technologie, oscilace laserového svazku.
Počet stran	70
Jazyk	Český

## **Bibliographical identification:**

Autor's first name and surname	Jiří Hůsek
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint Laboratory of Optics of PU and IP CAS
Supervisor	RNDr. Hana Chmelíčková
The year of presentation	2019
Abstract	This thesis brings a brief overview of the conventional methods of welding the copper and its alloys, furthermore it also reviews laser welding technologies and modern welding methods, which are being used for welding copper and its alloys using laser. The conclusion of this thesis is showing the chosen methods of welding using laser and evaluation of the results.
Keywords	Copper welding, modern laser technology, wobbling.
Number of pages	70
Language	Czech

Rád bych poděkoval své vedoucí práce RNDr. Haně Chmelíčkové za podrobné seznámení s problematikou laserových technologií, za její vstřícnost a cenné rady, které mi poskytla v průběhu experimentu, ale i studia a v neposlední řadě za pomoc, kterou mi poskytla při realizaci experimentu.

Dále bych rád poděkoval pracovníkům SLO RNDr. Heleně Hiklové, Mgr. Lukáši Václavkovi a Bc. Sabině Malecové za pomoc s měřením v experimentální části práce.

Rád bych taktéž poděkoval své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou v průběhu studia a při jeho zakončení.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Spojování mědi a jejích slitin</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 Měkké a tvrdé pájení</b> .....	<b>9</b>
1.1.1 Měkké pájení.....	12
1.1.2 Tvrdé pájení .....	13
<b>1.2 Svařování elektrickým obloukem</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 Svařování obalenou elektrodou (MMA).....	15
1.2.2 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (MIG/MAG) .....	16
1.2.3 Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou (TIG).....	17
1.2.4 Obloukové svařování plazmou (PAW).....	18
<b>1.3 Svařování tlakem</b> .....	<b>18</b>
1.3.1 Odporové svařování.....	19
1.3.2 Svařování třením .....	20
1.3.3 Difuzní svařování.....	20
1.3.4 Svařování ultrazvukem.....	21
<b>1.4 Svařování elektronovým svazkem (EBW)</b> .....	<b>22</b>
<b>2 Možnosti svařování mědi a jejích slitin lasery</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 Lasery pro svařování mědi a jejích slitin</b> .....	<b>26</b>
2.1.1 CO <sub>2</sub> lasery.....	26
2.1.2 Nd:YAG laser .....	27
2.1.3 Diskové lasery .....	27
2.1.4 Vláknové lasery .....	29
2.1.5 Diodové lasery.....	30
<b>2.2 Laserové hybridní svařování</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3 Pokročilé metody svařování mědi a jejích slitin laserem</b> .....	<b>32</b>
2.3.1 Mikro svařování mědi a hliníku .....	32
2.3.2 Svařování mědi modrým laserem .....	33
2.3.3 Porovnání svařování mědi infračerveným a zeleným laserem .....	35
2.3.4 Metoda oscilace laserového svazku (wobbling).....	36
2.3.5 Závislost absorpce laserového svazku na drsnosti povrchu.....	38
<b>3 Experiment</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1 Materiál</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2 Zařízení</b> .....	<b>40</b>
3.2.1 Laserový systém KLS 246 - 102 .....	40
3.2.2 Laserový rastrovací konfokální mikroskop LEXT OLS5000 .....	40
3.2.3 Kontaktní profilometr Form Talysurf Series 2.....	41
3.2.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	42
<b>3.3 Provedené experimenty</b> .....	<b>43</b>
3.3.1 Příprava vzorků pro svařování.....	43
3.3.2 Optimální nastavení parametrů laseru .....	44
3.3.3 Metoda svařování s oscilací laserového svazku .....	45
3.3.4 Změna drsnosti povrchu .....	46
3.3.5 Přípravky pro optickou metalografii svarů.....	46
<b>4 Výsledky</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1 Pracovní parametry laseru v experimentální části</b> .....	<b>47</b>

4.2	Analýza povrchů svarů .....	49
4.3	Analýza metalografických vzorků .....	57
4.4	Zkouška tvrdosti .....	61
5	<i>Závěr</i> .....	62
	<i>Seznam použitých zdrojů</i> .....	64
	<i>Seznam použitých symbolů</i> .....	70

## Úvod

Svařování mědi a jejích slitin je v dnešní době žádaný proces. Pro svary je požadována co nejvyšší pevnost a kvalita, tedy bez výskytu pórů, vměstků a intermetalických fází, které snižují pevnost svaru. Svary vytvořené konvenčními metodami, jako je např. svařování obloukem, nedosahují požadovaných kvalit a přesností. Další volbou mohou být metody, které jsou založeny na tlakovém principu. Tyto metody se ovšem většinou potýkají s omezením geometrií, které lze jimi svařovat.

Do popředí nastupuje laserové svařování. Donedávna používané CO<sub>2</sub> lasery, které vysokou odrazivost mědi pro jejich generovanou vlnovou délku svazku 10 600 nm doháněly vysokým výkonem, jsou v posledních letech vystřídány za laserové systémy s nižší generovanou vlnovou délkou a s možností navázat laserový svazek do optického vlákna v robotické části a tím mnohonásobně urychlit proces. Taktéž byly vyvíjeny metody pro zlepšení svařování problémových materiálů. Mezi tyto metody patří oscilace laserového svazku (anglicky wobbling), změna drsnosti povrchu či regulace energie v pulzu v průběhu svařování.

V teoretické části se práce zabývá konvenčními metodami, které jsou používány pro svařování mědi a jejích slitin. Dále budou popsány moderní laserové systémy, které se běžně používají pro v průmyslových aplikacích. Jsou zde zmíněny laserové svařovací metody, které byly vyvinuty a zkoumány pro materiály, u kterých se laserový systém setkává s problémem vytvoření metalurgického spoje.

V praktické části budou experimentálně provedeny některé vybrané metody pro laserové svařování, které byly popsány v teoretické části. U svarů budou prozkoumány jejich mikrostruktury, taktéž bude provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse pro vybraný svar a jeho okolí.



# 1 Spojování mědi a jejích slitin

Měď a většina jejích slitin má kubickou mřížku plošně centrovanou [1]. Měď se vyznačuje velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Taktéž má dobrou pevnost v tahu, tváritelnost a odolnost proti korozi. Tyto vlastnosti ji dělají vhodnou pro průmyslové využití v elektroinstalacích, ve stavebnictví a v poslední době, z důvodu elektronických systémů, v automobilovém průmyslu. Měď a její slitiny rozdělujeme do osmi hlavních skupin. Tyto skupiny jsou měď, slitiny s vyšším obsahem mědi, mosaz, bronz, měď-nikl, měď-nikl-zinek, olovnatá měď a speciální slitiny mědi [2]. Každá z těchto skupin může být potom dále rozdělena na tvářenou a litou slitinu. Přehled skupin je uveden v tabulce 1.

Měď a její slitiny je v průmyslových aplikacích zapotřebí spojovat v nerozebíratelné celky. Využívají se technologické procesy jako svařování, měkké i tvrdé pájení. Různé metody mají rozdílné výhody, a proto se používají v odlišných průmyslových aplikacích. Svařování dělíme na tavné a tlakové. Metody tavného svařování jsou založeny na roztavení materiálu a jeho následném spojení s nebo bez přídavného materiálu. Tlakové svařování zahřeje materiál buď na teplotu tavení nebo pod teplotu tavení a působením sil se docílí metalurgického spojení. Souhrn použitelnosti těchto metod na měď a její slitiny je podrobněji vyobrazeno v tabulce 2.

S neustálým zmenšováním velikosti součástí je zapotřebí zdokonalovat metody a technologie spojování. Do oboru tavného svařování patří i laserová technologie. Lasery se osvědčily jako vhodný nástroj pro svařování. Proti jejich výhodám, mezi které patří rychlost, přesnost, malé tepelné ovlivnění okolí svaru, stojí vysoká pořizovací cena a provozní náklady, vysoká odrazivost povrchu, elektrická a tepelná vodivost materiálu, vysoké nároky na sestavení svaru. Svařování mědi pomocí laseru je závislé na vlnové délce záření.

## 1.1 Měkké a tvrdé pájení

Pájení je metoda spojení dvou nebo více předmětů roztaveným přídavným materiálem, kdy nedochází k roztavení spojovaného materiálu. Mezi přídavným materiálem a obrobkem se vytvoří metalurgický spoj, tedy částice spojovaných materiálů se spojí na fyzikální úrovni [3]. Na přídavný materiál působí síla, kterou nazýváme kapilární přitažlivost [4]. Pájení se dělí na tvrdé a měkké. Rozdíl mezi měkkým a tvrdým pájením je teplota tavení přídavného materiálu. Pro měkké pájení je teplota tavení přídavného materiálu pod 450 °C, pro tvrdé pájení je nad touto teplotou.

Pájením se spojují materiály, které by svařováním spojit nešlo, a to z důvodů vysokých teplot svařování nebo omezení možnosti spojit rozdílné materiály [5]. Pájení se osvědčilo jako vhodná metoda pro spojování mědi a jejích slitin. Jedná se ekologický proces s nízkým tepelným ovlivněním spojované oblasti. Jelikož obrobek není poškozen, tak části můžou být od sebe později opět odděleny [6]. Pájení se stalo velmi oblíbenou metodou pro spojování materiálů, protože namísto ochranných atmosfér se na povrch spojovaných materiálů nanáší tavidlo.

Tabulka 1: Rozdělení mědi a měděných slitin. Převzato a upraveno z [2].

Skupina	Složení	UNS No.
<b>Tvářené slitiny</b>		
Měď	Měď – minimálně 99,3 %	C10100–C15735
Měď s vysokým obsahem příměsí	Měď – 96 do 99,2 %	C16200–C19600
Mosazi	Měď-zinek	C20500–C28200
Olovnaté mosazi	Měď-zinek-olovo	C31400–C38600
Cínové mosazi	Měď-zinek-cín	C40500–C48500
Fosforové bronzy	Měď-cín-fosfor	C50100–C52400
Olovnaté fosforové bronzy	Měď-cín-olovo-fosfor	C53200–C54800
Hliníkové bronzy	Měď-hliník	C60600–C64400
Silikonové bronzy	Měď-silikon	C64700–C66100
Smíšené mosazi	Měď-zinek	C66400–C69910
Měď-nikl	Nikl – 3 až 30 %	C70100–C72500
Niklové stříbra	Měď-nikl-zinek	C73200–C79900
<b>Lité slitiny</b>		
Měď	Měď – minimálně 99,3 %	C80100–C81100
Měď s vysokým obsahem příměsí	Měď – 94 do 99,2 %	C81300–C82800
Děloviny	} Měď-cín-zinek a měď-cín-zinek-olovo	C83300–C83800
Olovnaté červené mosazi		C84200–C84800
Žluté mosazi		C85200–C85800
Manganové bronzy	Měď-zinek-železo	C86100–C86800
Silikonové bronzy a mosazi	Měď-zinek-silikon	C87200–C87900
Cínové bronzy	Měď-cín	C90200–C91700
Olovnaté cínové bronzy	Měď-cín-olovo	C92200–C94500
Nikl-cínové bronzy	Měď-cín-nikl	C94700–C94900
Hliníkové bronzy	Měď-hliník-železo a měď-hliník-železo-nikl	C95200–C95800
Mědinikl	Měď-nikl-železo	C96200–C96600
Niklové stříbra	Měď-nikl-zinek	C97300–C97800
Olovnaté mědi	Měď-olovo	C98200–C98800
Speciální slitiny		C99300–C99750

Tabulka 2: Použitelnost spojovacích metod pro měď a její slitiny.

Převzato a upraveno z [1].

Měď a její slitiny	USN No.	Plamenné svařování		MMA	MIG/ MAG	TIG	Odporové svařování		Svařování tlakem	Tvrdé pájení	Měkké pájení	Svařování elektronovým svazkem
		S	N				S	N				
Elektrolyticky rafinovaná měď	C11000–C11900	N	N	N	S	S	N	N	D	V	D	N
Bezkyšlíkatá měď	C102000	S	N	N	D	D	N	N	V	V	V	D
Deoxidovaná měď	C12000, C123000	D	N	N	V	V	N	N	V	V	V	D
Beryliová měď	C17000–C17500	N	N	S	D	D	S	S	S	D	D	S
Kadmiová/ Chromová měď	C16200, C18200	N	N	N	D	D	N	S	S	D	D	S
Dělovina (červená mosaz), 85%	C23000	S	N	N	D	D	S	D	D	V	V	V
Mosaz, 80%	C24000	S	N	N	D	D	D	D	D	V	V	V
Žlutá mosaz, 70%	C26000	S	N	N	S	S	D	D	D	V	V	V
Olovnatá mosaz	C31400–C38590	N	N	N	N	N	N	N	N	V	V	D
Fosforová bronz	C50100–C52400	S	S	S	D	D	D	D	D	V	V	V
Měď-nikl (30%)	C71500	S	S	S	D	D	D	D	D	V	V	S
Měď-nikl (10%)	C70600	S	S	D	V	V	D	D	D	V	V	D
Niklové stříbro	C75200	D	N	N	D	D	S	S	D	V	V	V
Hliníková měď	C61300, C61400	N	N	D	V	V	D	D	D	S	N	D
Silikonový bronz	C65100, C65500	D	S	S	V	V	D	D	D	V	D	D

Poznámka: V – výborný, D – dobrý, S – slušný, N – nedoporučuje se

### 1.1.1 Měkké pájení

Měď a její slitiny jsou v inženýrství nejčastěji spojovány měkkým pájením. Přídavný materiál používaný pro měkké pájení má teplotu tavení 450 °C. Slitiny mědi obsahující beryllium, silikon nebo hliník vytváří na povrchu oxidy, které se musí odstranit tavidlem [1]. V tabulce 3 jsou uvedeny možnosti pájení mědi a jejích slitiny.

Přídavné materiály používané pro spojování mědi a jejích slitin jsou slitiny cínu a olova. Využívají se taktéž bezolovnaté slitiny, a to slitiny cínu a antimonu nebo cínu a stříbra. Bezolovnaté slitiny se používají pro tepelně namáhané spoje, které musí vydržet stálou teplotu 120 °C bez porušení [8]. Měkké pájení se nejčastěji používá pro spojování elektrických komponentů. Používaná tavidla pro měkké pájení bývají na organické bázi a kalafuny, které se aplikují na předem očištěné povrchy. Pro hliníkové a silikonové bronzы je zapotřebí použít speciální anorganická tavidla [2]. Měď a její slitiny se využívají pro ventilátory do elektrických motorů kvůli jejím nemagnetickým a nejiskřícím vlastnostem, kde se taktéž uplatňuje její spojování měkkým pájením [1].

Tabulka 3: Možnosti spojování mědi a jejích slitin měkkým pájením.

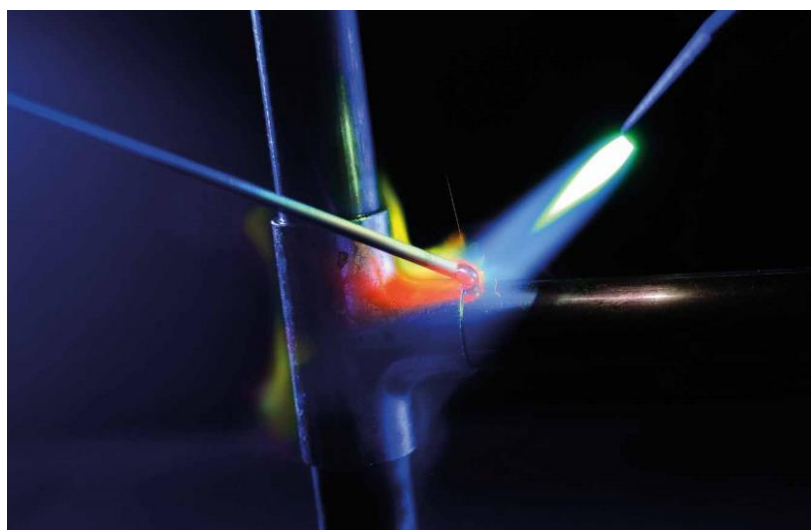
Převzato a upraveno z [1].

<b>Obrobek</b>	<b>Pájitelnost</b>
Měď (ETP, bezkyslíkatá, fosforizovaná, arzénová, s obsahem stříbra, olovnatá, telur, se selenem)	Velmi dobře se pájí s použitím nekorozivní kalafuny a s očištěním povrchu.
Slitina mědi a titanu	Dobře se pájí s organickými tavidly (kalafuna).
Slitina mědi a zinku	Dobře se pájí s tavidly proti korozi.
Slitina mědi s chromem a mědi s beryliem	Dobře se pájí. Je zapotřebí předem vyčistit povrch a použít tavidlo proti korozi.
Slitina mědi a silikonu	Pro pájení není příliš vhodné. Silikon na povrchu produkuje žíravé oxidy. Povrch je nutné nejprve očistit a nanést tavidlo proti korozi.
Slitina mědi a hliníku	Pájení bývá problémové. Slitiny s vyšším obsahem hliníku jsou zapotřebí pájet se speciálními tavidly proti korozi. Pro zlepšení kvality spojů je vyžadováno předežhřátí.
Manganový bronz s vysokou pevností v tahu	Nedoporučuje se pájet. Povrch je před procesem nutné pokovit pro snadnější pájení.

### 1.1.2 Tvrdé pájení

Měď a její slitiny jsou nejnáze spojovaný materiál tvrdým pájením [7]. Nanesením tavidla před procesem se zabrání oxidaci povrchu materiálu a dochází taktéž ke zlepšení smáčivosti. Metody tvrdého pájení, především využívané v průmyslu, jsou pájení plamenem, pájení v peci, indukční pájení, odporové pájení, pájení ponorem, infračervené pájení [4].

Použitá metoda a přídavný materiál závisí na druhu měděné slitiny, kterou spojujeme [7]. Pro pájení mědi a jejích slitin je nevhodné odporové a indukční pájení, a to z důvodu dobré elektrické vodivosti mědi. Vhodnými metodami jsou pájení plamenem a pájení v peci. Jako přídavný materiál pro pájení mědi a jejích slitin se přednostně používá měď, fosforová měď, slitiny stříbra a slitiny zlata. Stříbro se především používá v elektronice, slitina měď-fosfor se může použít ke spojení většiny slitin mědi bez použití tavidla z důvodu deoxidačního účinku fosforu a slitina měď-zinek z důvodu vyšší teploty tání nemůže být použita pro spojování mosazi nebo niklového stříbra, ale je doporučena pro čistou měď [2], [8]. Na obrázku 1 je ukázka tvrdého pájení měděné trubky plamenem.



Obrázek 1: Měděná trubka pájena plamenem, tvrdé pájení. Převzato z [8].

### 1.2 Svařování elektrickým obloukem

Obloukové svařování patří mezi tavné metody svařování. K vytvoření svaru se využívá elektrického oblouku mezi elektrodou (anodou) a obrobkem (katodou). Do roztaveného obrobku se může přidat i přídavný materiál. K vytvoření elektrického oblouku se využívá střídavý nebo stejnosměrný nízkonapěťový zdroj (desítky voltů), který může dodávat tisíce ampér. Vzhledem k velmi dobré vodivosti mědi se musí měděné obrobky před

svařováním přehřát na potřebnou teplotu. Slitiny mědi mají nižší teplotu tání, proto vyžadují malé nebo žádné přehřátí. Všeobecně se lépe svařují materiály s nižším obsahem kyslíku kvůli vodíkové nemoci mědi. Deoxidováním mědi a ochrannou atmosférou kolem svaru může být zmírněn vstup vodíku do svaru.

Často používané metody pro svařování mědi a jejích slitin v průmyslu jsou svařování obalenou elektrodou (MMA), obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (MIG/MAG) a obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou (TIG). Elektrodu, která má funkci i jako přídavný materiál, volíme na základě materiálu, který budeme svařovat. V tabulce 4. jsou uvedeny přídavné materiály ve formě obalených elektrod, drátů a tyčinek, které se používají pro svařování mědi a jejích slitin metodami MMA, MIG/MAG a TIG s uvedenou AWS (American Welding Society) klasifikací.

Tabulka 4: Přídavné materiály ve formě elektrod, drátů a tyčinek pro MMA, MIG/MAG a TIG svařování. Převzato a upraveno z [10].

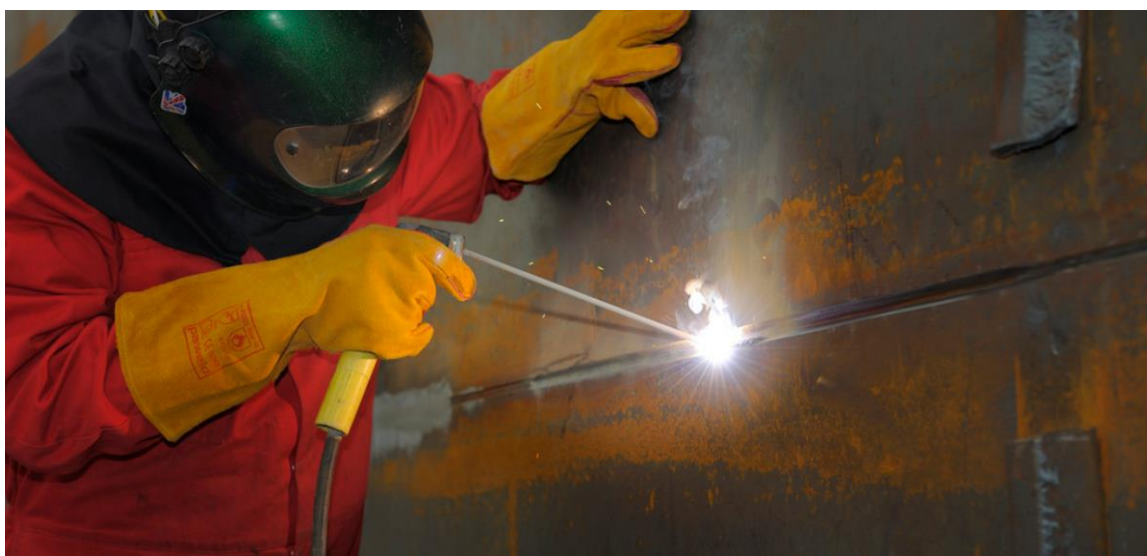
Název	AWS klasifikace		Aplikace
	Elektrody	Dráty a tyčinky	
Měď	ECu	ERCu	Svařování deoxidované mědi a elektrolyticky rafinované (ETP) mědi.
Silikonový bronz	ECuSi	ERCuSi-A	Svařování silikonového bronzu, mědi a mosazi. Vytváří ochrannou vrstvu proti chemikáliím a mořské vodě.
Fosforový bronz	ECuSn-A, C	ERCuSi-A	Svařování fosforového bronzu, mědi a mosazi. Vytvoření vrstvy odolné proti chemikáliím.
Hliníkový bronz	ECuAl-A2, B	ERCuAl-A1, A2, A3	Svařování hliníkového bronzu. Opravy svařování chemických strojů, válců a lodních vrtulí.
Nikl hliníkový bronz	ECuNiAl	ERCuNiAl	Svařování tvářeného nebo litého nikl hliníkového bronzu.
Mangan-nikl hliníkový bronz	ECuMnNiAl	ERCuMnNiAl	Svařování tvářeného nebo litého mangan-nikl hliníkového bronzu.
Mědinikl	ECuNiAl	ERCuNi	Svařování tvářeného nebo litého mědiniklu. Vytváří se vrstva odolná proti mořské vodě.

### 1.2.1 Svařování obalenou elektrodou (MMA)

Měď a většina jejích slitin se převážně svařuje v ochranném plynu. V méně stěžejných aplikacích se využívá i MMA [1]. MMA využívá odtavující se kovovou elektrodu s obalem, kde obal má funkci plynotvornou, ionizační a metalurgickou [9]. Oblouk dosahuje teploty nad 5000 °C [2]. Plyn vytvořen elektrodou chrání svar před atmosférickými nečistotami a vniknutím kyslíku do svaru. Pro aplikace, kde je materiál více reaktivní s okolní atmosférou, však toto řešení není vhodné. Ukázka MMA metody v činnosti je na obrázku 2.

ECu elektroda se převážně používá pro svařování deoxidované mědi. Svar vytvořen ECu elektrodou u ETP mědi a bezkyslíkaté mědi bude obsahovat pórovitost a oxidové vměstky. Pro aplikace, které nevyžadují vysokou tepelnou a elektrickou vodivost se využívají i elektrody ECuSi, ECuSn-A a ECuSn-C. Elektrody ECuSn-A a ECuSn-C se používají taktéž pro svařování fosforového bronzu. Pro slitiny fosforového bronzu s příměsí olova metoda MMA vykazuje lepší výsledky oproti metodě MIG/MAG [1]. Silikonový bronz vykazuje nižší tepelnou vodivost, dobrou deoxidaci a tím tedy dobrou svařitelnost. MMA metodou je snadné svařovat silikonový bronz s použitím elektrody ECuSi nebo ECuAl-A2 [10].

MMA metodou se dají svařovat měděné slitiny tloušťky (2,4-4,8) mm [6]. Jedná se o velmi jednoduchou svařovací metodu s minimálními náklady. Díky její flexibilitě se MMA využívá především ve stavebnictví a pro opravu konstrukcí. V průmyslu ji vystřídal novější metody MIG/MAG a TIG, které vytváří oblouk o vyšší tepelné koncentraci.



Obrázek 2: Sváření MMA metodou. Převzato z [11].

## 1.2.2 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu (MIG/MAG)

MIG/MAG proces je prováděn primárně poloautomaticky. Tavící elektroda je plynule dodávána na místo svaru podavačem drátu [3]. Používá se zdroj konstantního napětí, který udržuje konstantní délku elektrického oblouku. Kvůli této autoregulaci není potřeba operátora a MIG/MAG se robotizuje [12]. Kolem elektrody ve formě „nekonečného“ drátu nyní prochází plyn, který vytváří ochrannou atmosféru. Používané plyny jsou buďto interní, a to např. argon, helium (MIG) nebo aktivní CO<sub>2</sub> (MAG). Od toho se odvozuje název MIG – Metal-arc Inert Gas welding a MAG – Metal-arc Active Gas welding.

Jako u svařování metodou MMA se svařuje měď přídavným materiálem, tentokrát typu ERCu, ERCuSi-A, ERCuSn-A. Lepší tepelná koncentrace metody MIG/MAG zajišťuje lepší svar než u metody MMA. Metoda MIG/MAG je doporučena pro svařování silnějších úseků fosforového bronzu s přídavným materiálem ERCuSn-A. Svařováním hliníkového bronzu se vytváří na povrchu oxidy hliníku, které zhoršují svařitelnost obrobku. Metodou MIG/MAG se proto svařuje hliníkový bronz s kladnou polaritou elektrody, kdy tento mód poskytuje čištění oxidů z povrchu. Doporučuje se použít přídavný materiál ERCuAl-A1, A2, A3 [10].

Měď a její slitiny se svařují v rozmezí tlouštěk (3,2–12,7) mm, ale je možné svařovat i materiály větších tlouštěk [6]. Při svařování mědi se využívá do tlouštěk 6,4 mm argon, kdy směs 75 % helia s 25 % argonu je používána pro silnější úseky [1]. Ukázka MIG/MAG metody a svar mědi vytvořený touto metodou je na obrázku 3.



Obrázek 3: Metoda MIG/MAG v praxi (vlevo). Převzato z [11]. Svaření měděné trubky metodou MIG (vpravo). Převzato z [13].

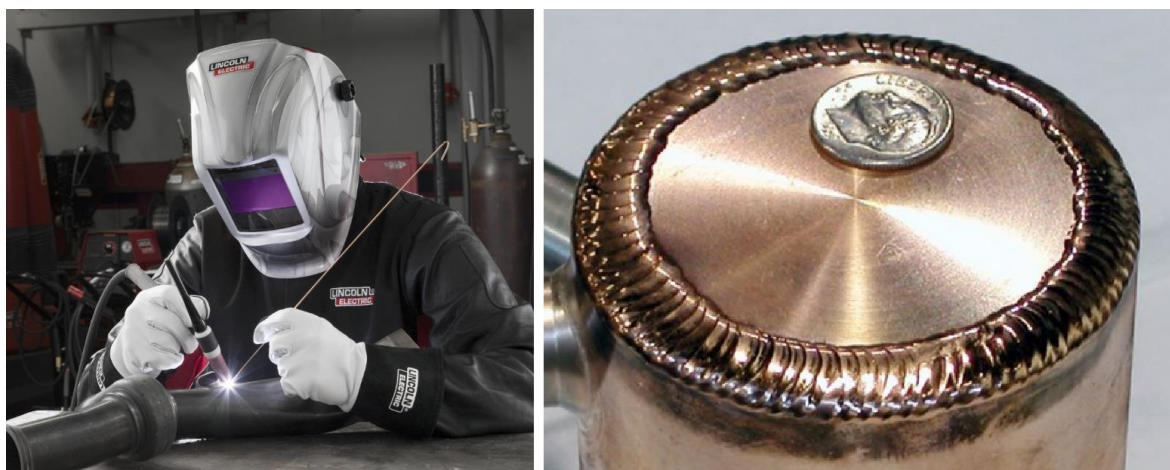


### 1.2.3 Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou (TIG)

TIG metoda je založena na elektrickém oblouku mezi netavící wolframovou elektrodou a obrobkem. Ochranný interní plyn chrání svarovou lázeň před okolní atmosférou. Přídavný materiál se dodává ve formě drátu nebo tyčinek.

TIG metoda je vhodná pro svařování mosazi. Svařování mosazi se potýká s problémem vypařování zinku z roztaveného materiálu, který následně zhoršuje kvalitu svaru [1]. TIG metoda je preferovanější oproti MIG/MAG, a to kvůli menšímu průniku při svařování, což vede k menšímu vypařování zinku. Jako přídavný materiál se používá fosforový bronz (ERCuSn-A), silikonový bronz (ERCuSi-A) a hliníkový bronz (ERCuAl-A2) [10]. Metodou TIG se svařují plechy fosforového bronzu s ERCuSn-A přídavným materiálem. Při svařování hliníkového bronzu se používá střídavý proud, který má schopnost odstranit oxidy z oblasti svaru [10]. Přídavný materiál je stejný jako u MIG/MAG metody.

Měď a její slitiny se můžou svařovat touto metodou bez přídavného materiálu do tloušťky 3,2 mm. Běžné použití je do tloušťek 12,7 mm s použitím přídavného materiálu. Pro tenčí části se používá jako ochranný plyn argon. S rostoucí tloušťkou materiálu se musí snižovat rychlost a zajistit předehřátí materiálu nebo zaměnit plyn za helium či jeho směsi s argonem [7]. Pro tloušťky nad 12,7 mm je preferovanější metoda MIG/MAG [7]. Ukázka metody TIG v praxi a svar měděného obrobku je na obrázku 4.

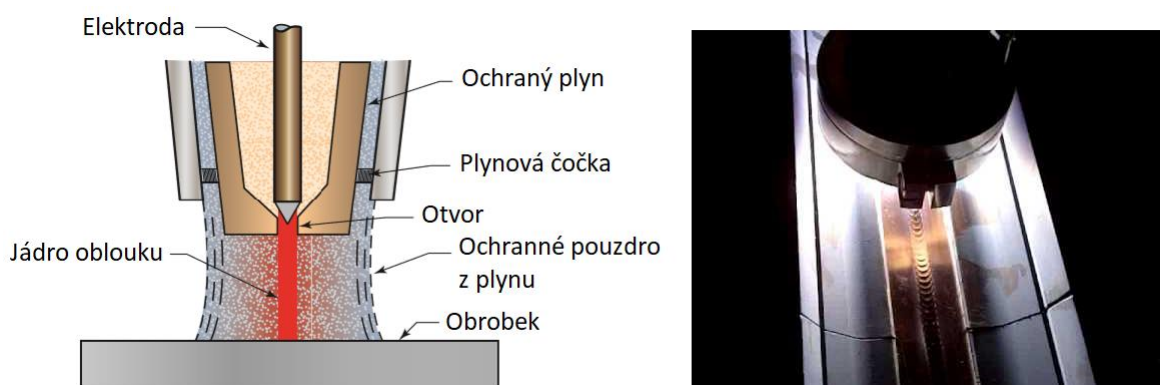


Obrázek 4: Metoda TIG v praxi (vlevo). Převzato z [11]. Měděný obrobek svařen metodou TIG (vpravo). Převzato z [14].

## 1.2.4 Obloukové svařování plazmou (PAW)

Jedná se o obdobnou metodu metody TIG. Oblouk je vytvořen mezi elektrodou, která bývá většinou z wolframu, a obrobkem. Kolem elektrody prochází plyn, který je ionizován a vyplňuje prostor mezi elektrodou a obrobkem. Plyn prochází malým otvorem a při jeho ionizaci je vytvořen oblouk se sloupcovitým tvarem a o vyšší intenzitě než u TIG svařování [12]. Plazmový oblouk nemá tak kónický tvar jako oblouk u metody TIG, proto je plazmový oblouk méně náchylný na kolísání délky, a to přibližně desetkrát [5]. Vedle otvoru pro ionizovaný plyn se nachází otvor pro ochranný plyn. Na obrázku 5 je popis plazmového oblouku a ukázka svařování mědi o tloušťce 0,55 mm plazmou v průmyslu.

Pro svařování mědi a jejích slitin se využívá přídavný materiál obdobný jako u metody TIG. Ochranný plyn je opět argon, helium nebo směs těchto dvou plynů. Jedná se o preferovanější metodu před metodou TIG, a to z důvodu eliminace kontaminace elektrody. Elektroda je v případě PAW skryta a chráněna okolním plynem [7].



Obrázek 5: Schématické znázornění plazmového svařování (vlevo). Převzato z [6]. Ukázka svařování mědi plazmou (vpravo). Převzato z [15].

## 1.3 Svařování tlakem

Svařování tlakem je rozděleno do několika dalších metod. Pro spojování mědi se v průmyslu používá odporové svařování, svařování třením, difuzní svařování a svařování ultrazvukem. Tyto metody mají společný proces vytvoření spoje, a to tlačáním povrchů spojovaných materiálu vůči sobě. Styčné plochy materiálů jsou vybranou metodou zahřívány a následně dochází k vytvoření metalurgického spoje.

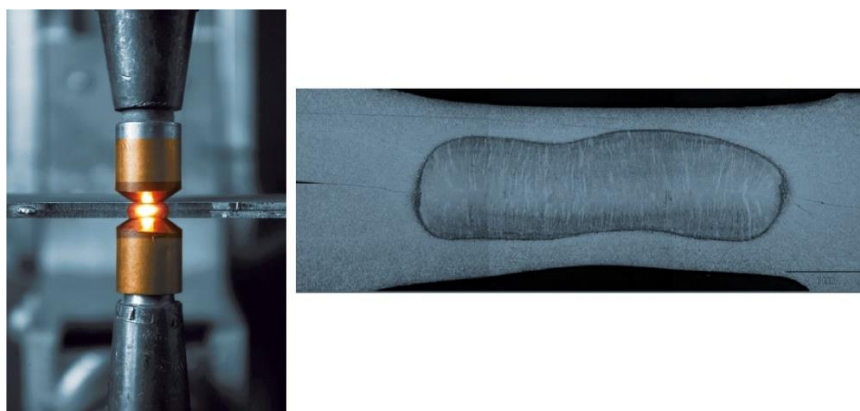
### 1.3.1 Odporové svařování

Tato metoda je založena na Joulově teple. Dvě elektrody tlačí na spojované materiály a zároveň jimi prochází proud. Spojovaný materiál musí mít větší odpor než elektrody, aby při průchodu proudu docházelo k natavení styčných ploch spojovaného materiálu. Tato metoda má několik podskupin, a to odporové bodové svařování, odporové švové svařování, odporové výstupkové svařování a odporové stykové svařování. Těmito metodami je většinou nevhodné svařovat měď, mohou se ale svařovat její slitiny, u kterých je menší tepelná a elektrická vodivost.

Odporovým bodovým a švovým svařováním se doporučuje svařovat pouze slitiny mědi s nižší tepelnou a elektrickou vodivostí. Odporové bodové svařování se používá na spojování plátů slitin mědi o tloušťce 1,52 mm [7]. Při navyšování napětí se elektrody začnou přivařovat ke spojovanému materiálu. Pro svařování měděných slitin těmito metodami je vhodné, aby jejich vodivost byla do 30 % vodivosti mědi [2].

Výstupkové svařování se nehodí pro měď a většinu bronzových slitin [7]. Pro svařování kulatých tyčí, trubek a plátů vyrobených z mědi a jejích slitin se v průmyslu využívá odporové stykové svařování. Stykové svařování se taktéž využívá pro spojování slitin mědi a olova s obsahem olova do 1 % [1].

S narůstající vodivostí se musí navyšovat hodnota proudu procházejícího elektrodami. Oproti odporovému svařování oceli, svařování mědi vyžaduje kratší čas pro vytvoření metalurgického spoje, vyšší hodnotu proudu a menší přitlačnou sílu. Materiál elektrod pro svařování mědi, bronzy či mosazi s vyšší elektrickou a tepelnou vodivostí je slitina mědi a zirkonu. Pro mosazi a bronzy s nižší vodivostí se pro elektrody používají slitiny mědi, zirkonu a chromu. Pro slitiny mědi s velmi nízkou vodivostí jsou elektrody vyrobeny ze slitiny mědi, niklu, silikonu a chromu [7]. Na obrázku 6 je uvedeno bodové odporové svařování a mikrostruktura bodového svaru.

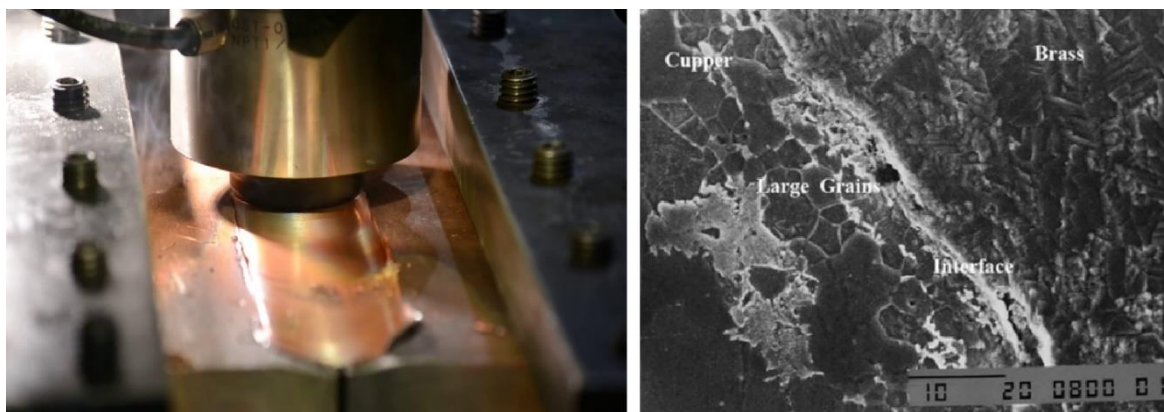


Obrázek 6: Vznik svaru mezi dvěma elektrodami (vlevo). Převzato z [16]. Přiblížení svaru vytvořeným bodovým odporovým svařováním (vpravo). Převzato z [17].

### 1.3.2 Svařování třením

Dva povrchy obrobků jsou k sobě tlačeny silou. První z nich je ve statické poloze a druhý, který je rotačně symetrický, rotuje. Třením dochází k vytvoření tepla. Teplota je nižší než teplota tavení obrobků. Svar je vytvořen skrz konstantní tepelné působení a následné plastické deformace. Metoda se používá většinou pro oba obrobky rotačně symetrické.

Svařování mědi touto metodou je velmi dobré, i když použití je omezené. Spojovat je možné měděné obrobky, ale i měď s dalšími materiály jako jsou hliník, stříbro, uhlíková ocel, nerezová ocel a titan [1]. Příklad svařování mědi třením a snímek vytvořený rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM), který zachycuje rozhraní spojení mědi s mosazí, je uveden na obrázku 7.



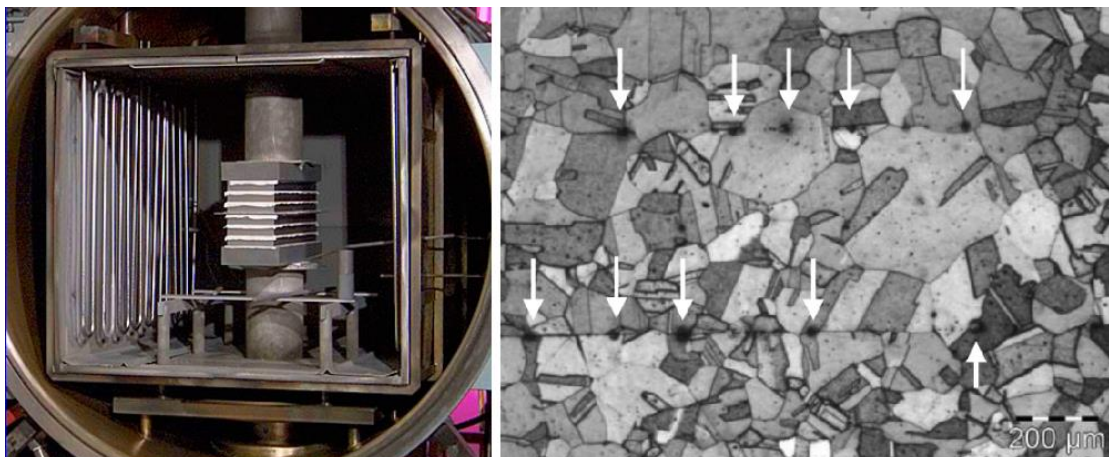
Obrázek 7: Ukázka svařování třením měděných obrobků (vlevo). Převzato z [18].

SEM fotografie rozhraní (interface) mědi (copper) s mosazí (brass) (vpravo).  
Převzato z [19].

### 1.3.3 Difuzní svařování

Metoda využívá tlaku a teploty pro vytvoření spoje. Obrobek je uzavřen v ochranné atmosféře nebo ve vakuu, aby se předešlo oxidaci povrchů. Tato metoda vyžaduje vyšší přípravu spojovaných povrchů a delší potřebnou dobu pro vytvoření svaru, a to přibližně od několika minut až po hodiny [20]. Teplota při procesu dosahuje kolem (50–90) % teploty tavení materiálu. Mezi spojované strany povrchů se může vložit vrstva jiného materiálu, který může urychlit proces [21]. Používá se např. stříbro, které má minimální potřebnou dobu pro vytvoření spoje s materiálem [7], [1].

Tato metoda se využívá pro spojování mědi s hliníkem. Difuzním svařováním se spojují trubky, pláty, ale i složitější geometrie a velmi tenké sekce [1]. Systém pro vytváření difuzních svarů a mikrostruktura svarů mědi po difuzním svaření je vyobrazena na obrázku 8.



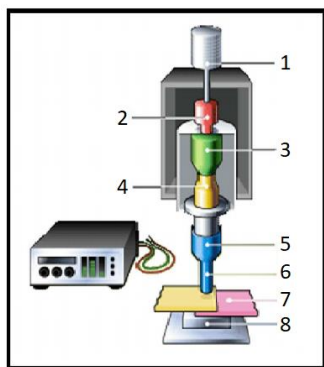
Obrázek 8: Systém pro difuzní svařování je umístěn ve vakuové komoře (vlevo).

Převzato z [22]. Mikrostruktura svarů mědi s viditelným růstem a spojením zrn na rozhraní (vpravo). Převzato z [23].

### 1.3.4 Svařování ultrazvukem

Obrobky jsou spojeny působením vysoce-frekvenčním akustickým chvěním a tlaku na materiál. Kmitání o frekvenci (15–75) kHz je přenášeno sonotrodou do místa vytvoření spoje [24]. Velikost použité síly působící na obrobky je závislé na tloušťce svařovaného materiálu. Pro měděný plech tloušťky 0,5 mm je potřeba 400 N, ale při větší tloušťce může potřebná síla dosahovat tisíce newtonů [25]. Vibrace způsobí navýšení teploty spojovaných povrchů, zbaví se taktéž oxidů a dochází k plastické deformaci. Teplota dosahuje (40–50) % teploty tavení materiálů. Tímto způsobem se spojí materiály, resp. vzniká svar [7]. Vstupní teplota a deformace povrchů je minimální. Svar je vytvořen během desetin, maximálně jednotek vteřin s malým přísunem energie.

Tato metoda je vhodná pro spojování materiálů s velkou tepelnou a elektrickou vodivostí, např. měď s hliníkem, ale i materiálů s rozdílným tepelným odporem, např. měď s ocelí. Nabízí se i svařování kovových materiálů s nekovovými. Použití metody je ve všech průmyslových odvětvích, např. v leteckém a automobilovém průmyslu a dále ve zdravotnictví [1]. Schéma ultrazvukového systému pro svařování a měděné kabely svařeny ultrazvukovým svařováním jsou na obrázku 9.



1. Pneumatický píst
2. Transducer (vytváří ultrazvukové vibrace)
3. Měníč (mění elektrický signál na mechanické vibrace)
4. Posilovač (úprava velikosti vibrací)
5. Sonotroda (slouží jako vodič pro vibrace na obrobek)
6. Hrot
7. Svařovaný materiál
8. Kovadlina



Obrázek 9: Ultrazvukový systém s popisem (vlevo). Převzato a upraveno z [26].

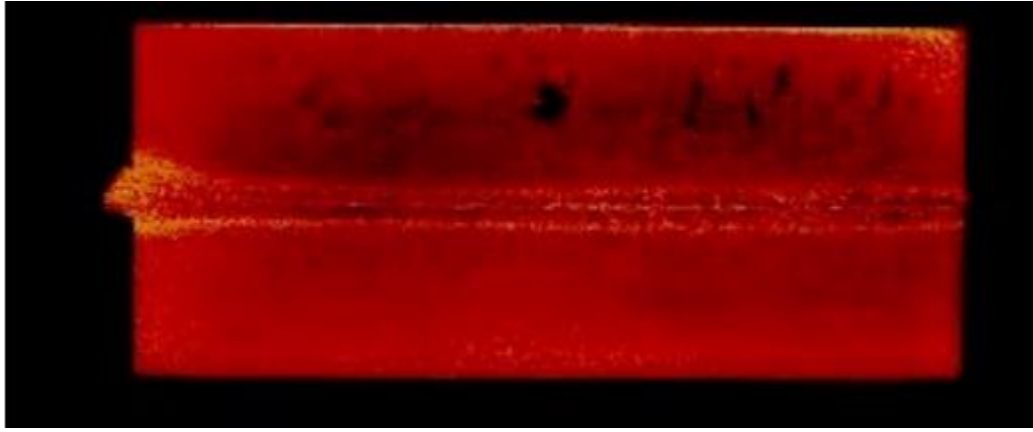
Svary měděných kabelů (vpravo). Převzato z [27].

## 1.4 Svařování elektronovým svazkem (EBW)

Elektronový svazek je tvořen rychle se pohybujícími elektrony, které naráží na obrobek. Elektronový svazek je tvořen v elektronovém dělu, které elektrony urychluje napětím (30–175) kV při (50–1000) mA. Kinetická energie elektronu je předávána materiálu ve formě tepla. Teplota dosahuje až 100 000 °C na ploše (0,3–0,8) mm<sup>2</sup> [6], [21].

EBW má tři variace způsobů svařování: vysoké vakuum ( $10^{-6}$ – $10^{-3}$ ) torr, střední vakuum ( $10^{-3}$ –25) torr a bez-vakuové svařování. Výhody vysokého vakua jsou redukce oxidace povrchu a zmenšení kontaminace svaru vodíkem. Nevýhodou je, že evakuování zabírá hodně času a omezení prostoru vakuovou komorou. V tomto módu je největší penetrace do materiálu. Při středním vakuu dochází k rozšiřování svazku a dochází ke kontaminaci svaru. V prostředí bez vakua, resp. s atmosférou, je svazek nejširší. Jako atmosféra se používá helium, vzduch a argon. Největší penetrace je dosažena s heliem, které je z těchto plynů nejlehčí, následuje vzduch a potom argon. Penetrace materiálu může být ovlivněna změnou urychlovacího napětí elektronů, průměrem svazku a rychlostí posunu elektronového děla [21].

Svařování mědi metodou EBW se osvědčilo pro svařování tenkých, ale i širokých měděných obrobků až do 15 cm [28]. Měď se před vytvořením svaru doporučuje předehřát. Při svařování nízkoenergetickými metodami, jako je například TIG metoda, je zapotřebí většího předehřátí. Metoda elektronové svazku patří mezi vysoce energetické metody. Na obrázku 10 je uveden svar vytvořený elektronovým svazkem v 13,5 cm široké mědi s příměsí 0,5 % chromu. Urychlovací napětí elektronů bylo 145 kW a svařovací rychlost 280 mm/min bez použití přídavného materiálu.



Obrázek 10: Svar vytvořený elektronovým svazkem ve slitině mědi s chromem.

Převzato z [16].

## 2 Možnosti svařování mědi a jejích slitin lasery

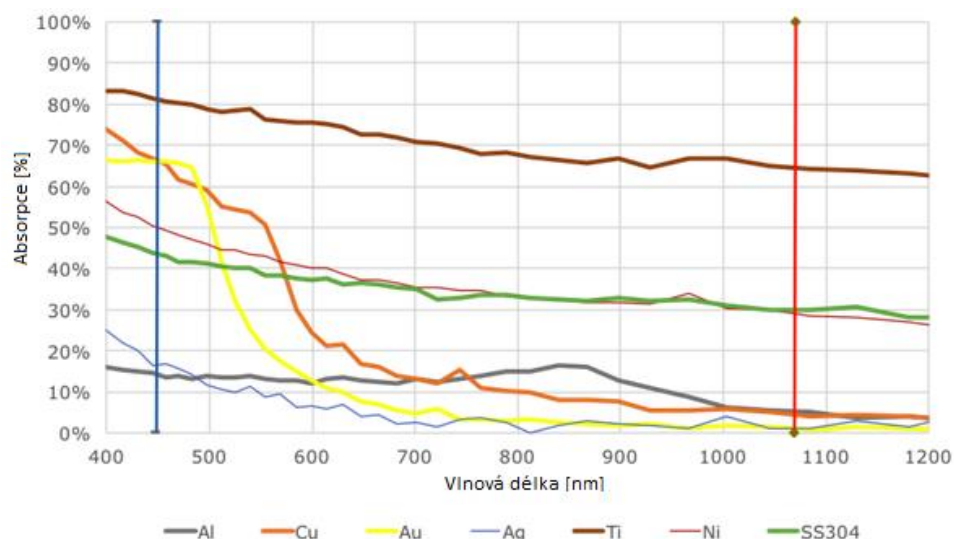
Laserový systém produkuje koherentní monochromatické záření a po fokusaci spojnou optikou jej soustředí do velmi malého bodu. Laser se skládá ze tří základních součástí, a to aktivního prostředí, rezonátoru a zdroje energie. Zdroj energie vybudí částice v aktivním prostředí na vyšší energetické hladiny, které se následně spontánní emisí vrátí do původní energetického stavu, a přitom vyzáří foton. Při dosažení populační inverze fotony spontánní emise způsobují stimulovanou emisi. Vše se odehrává v rezonátoru složeném ze dvou odrazných zrcadel, které slouží pro zesilování stimulované emise odrazem fotonů. Jedno ze dvou zrcadel rezonátoru je polopropustné. Tudy laserový svazek prochází do dalších optických systému, které slouží pro jeho úpravu. Laserový svazek nakonec vystupuje z laserové hlavy.

Po dopadu laserového svazku na materiál se část absorbuje a část odrazí v závislosti na materiálu a typu laserového záření. Graf na obrázku 11 uvádí příklad závislosti absorpce laserového svazku v různých kovových materiálech na vlnové délce. Absorbovaná část svazku roztaví a při vyšších energiích i vypaří část materiálu a tím vytvoří kapiláru tzv. keyhole. Při nižších energiích dochází ke kondukčnímu svařování. Laserový svazek může být absorbován vypařenou částí materiálu a tím vytvořit plazmu, proto je v některých případech nutno využít ochrannou atmosféru. Tloušťky svařovaných materiálů (plastů, kovů) se pohybují v rozsahu (0,01–50) mm [29].

Rozdělení laserů lze provést na základě druhu aktivního prostředí a vlnové délky, kterou generují. Pro svařování mědi a jejích slitin se v průmyslu používají pevnolátkové infračervené lasery. I když měď má vysokou odrazivost pro infračervenou oblast, pevnolátkové lasery dosahují vysokých výkonů a po roztavení materiálu absorpce svazku v materiálu prudce narůstá. Vhodnější jsou ovšem lasery generující na zelené a modré vlnové délce, pro které má měď průměrnou hodnotu absorpce až 70 %. Druhy běžně používaných laserů v průmyslu jsou vypsány v tabulce 5.

Používané lasery pro svařování pracují v kontinuálních nebo pulzních módech s délkou pulzu (1–20) ms [29].





Obrázek 11: Absorpce laserového záření v materiálech v závislosti na vlnové délce.

Převzato z [30].

Tabulka 5: Druhy a charakteristika laserových systémů pro svařování.

Převzato a upraveno z [29].

Druhy laserů	Charakteristika laserů
CO <sub>2</sub> lasery	Vlnová délka: 10 600 nm Aktivní prostředí: směs plynů CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 50 kW, běžně (1–15) kW Účinnost: (8–15) %
Nd:YAG laser buzený výbojkou	Vlnová délka: 1 064 nm Aktivní prostředí: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> krystal Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 10 kW (kaskádový typ, spojení vláken), běžně 50 W až 7 kW Průměrný výkon (pulzní): 6 kW Účinnost: (1–4) %
Diodové lasery	Vlnová délka: (800–1 100) nm Aktivní prostředí: InGaAsP a další polovodiče Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 10 kW („stack“ typ), 15 kW (vlákem vedený typ) Vyvinuty i pro speciální aplikace s výkonem 50 kW. Účinnost: (20–60) %
Pevnolátkový laser buzený laserovými diodami	Vlnová délka: 1 000 nm Aktivní prostředí: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> krystal a další Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 13,5 kW (spojení vláken)
Diskový laser	Vlnová délka: 1 030 nm Aktivní prostředí: Yb <sup>3+</sup> :YAG, Nd:YVO <sub>4</sub> , Nd:YAG krystal a další Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 16 kW (kaskádový typ) Účinnost: (15–25) %
Vláknový laser	Vlnová délka: 1 070 nm Aktivní prostředí: Yb <sup>3+</sup> :SiO <sub>2</sub> krystal a další Průměrný výkon (kontinuální): maximálně 100 kW (spojení více vláken) Účinnost: (20–30) %

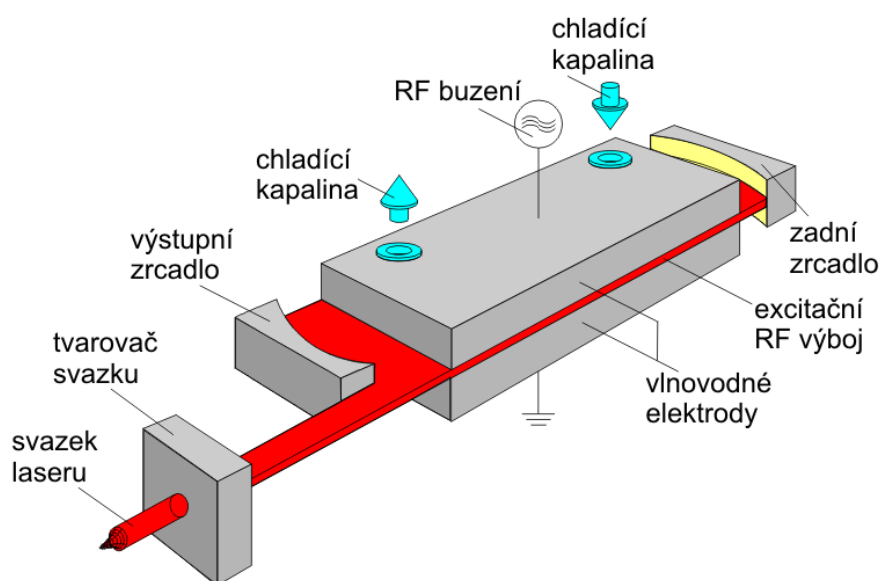
## 2.1 Lasery pro svařování mědi a jejích slitin

Pro svařování mědi a jejích slitin se v minulosti běžně používaly vysokovýkonné infračervené lasery CO<sub>2</sub>. S vývojem pevnolátkových laserů se CO<sub>2</sub> lasery zaměnily za Nd:YAG lasery, které generují záření v blízké infračervené oblasti a nyní nově přicházejí diodové, diskové a vláknové lasery, které disponují vysokým výkonem, velmi vysokou účinností a dobrou kvalitou svazku.

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

CO<sub>2</sub> lasery mají plynné aktivní prostředí, které tvoří směs oxidu uhličitého, dusíku a helia, pro buzení je použit stejnosměrný elektrický výboj nebo vysokofrekvenční proud. Generuje záření na vlnové délce 10 600 nm. Kvalita svazku do 20 kW je velmi vysoká, až  $K > 0,9$ . Průmyslové lasery se vyrábí do výkonu 50 kW [29]. Laserový svazek těchto laserů nemůže být navázán do optického vlákna. Povrch železných a neželezných kovů je vysoce odrazný pro tuto vlnovou délku. Záření CO<sub>2</sub> laserů taktéž podléhá velké absorpci v plazmě, proto je při svařování nutnost použít plyny s vysokým ionizačním potenciálem, například helium nebo jeho směs s argonem.

Moderním typem CO<sub>2</sub> laseru je difuzně chlazený deskový SLAB laser (obrázek 12). Výhodou je jeho vysoká kvalita svazku  $K = 0,95$ , zásobník plynu s minimální spotřebou a výkon do 8 kW.



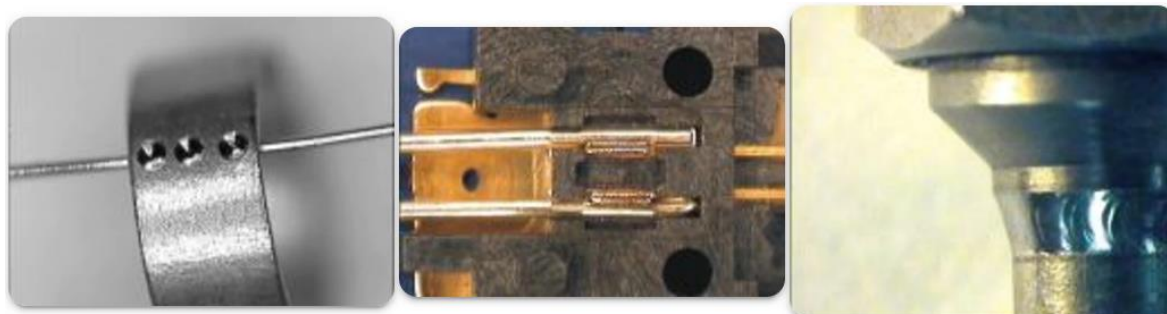
Obrázek 12: Rezonátor CO<sub>2</sub> SLAB laseru. Převzato z [31].

## 2.1.2 Nd:YAG laser

Nd:YAG laser patří mezi pevnolátkové pulzní a kontinuální lasery. V průmyslu se převážně používá pulzní režim. Aktivní prostředí Nd:YAG laseru je válcovitý krystal vyroben z yttrio-hlinitého granátu (YAG) dopovaný ionty neodymu (Nd) buzen laserovou diodou nebo xenonovou výbojkou. Krystal je umístěn mezi dvěma odraznými zrcadly. Výkon Nd:YAG laserů se pohybuje kolem 10 kW při vlnové délce 1 064 nm. S touto vlnovou délkou je možné laserový svazek navázat na optické vlákno napojené na robotickou hlavu. Nd:YAG může generovat taktéž druhou (525 nm) a třetí (355 nm) harmonickou vlnovou délku, ale výkon laseru se snižuje.

Jako ochranný plyn se používá argon, helium a jejich směs. Kyslík se v některých případech používá na hlubší penetraci a speciální aplikace. V publikaci profesora E. Bira a kol. bylo dokázáno, že kyslík vytváří vrstvu oxidu na povrchu mědi, která zvyšuje absorpci Nd:YAG laseru [32]. Směs kyslíku a argonu poskytovala velmi dobré výsledky, kdežto pevnost svaru se snižovala až při použití ochranného plynu s obsahem kyslíku nad 90 %. Ukázky svarů vytvořených Nd:YAG laserem na měděných obrobcích jsou na obrázku 13.

Výbojkou buzené Nd:YAG a CO<sub>2</sub> lasery jsou v průmyslu pomalu vystřídány kvůli jejich nízké účinnosti za diskové, vláknové a diodové lasery.

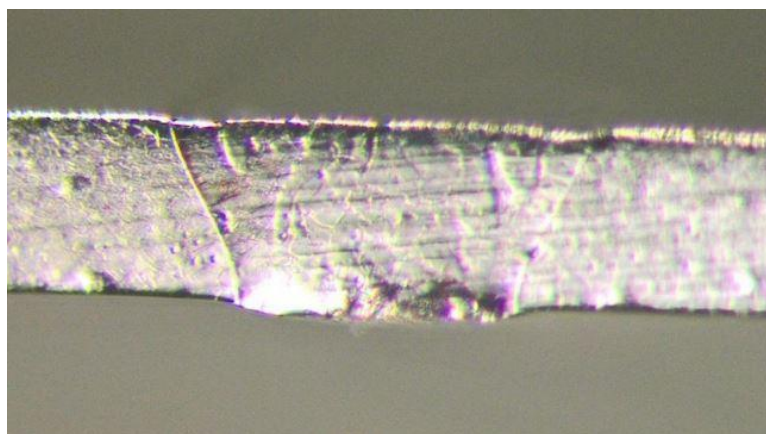


Obrázek 13: Bodové svařování drátu ke kroužku (vlevo), svari elektrických kontaktů (uprostřed) a svar na lékařském nástroji (vpravo). Převzato z [33].

## 2.1.3 Diskové lasery

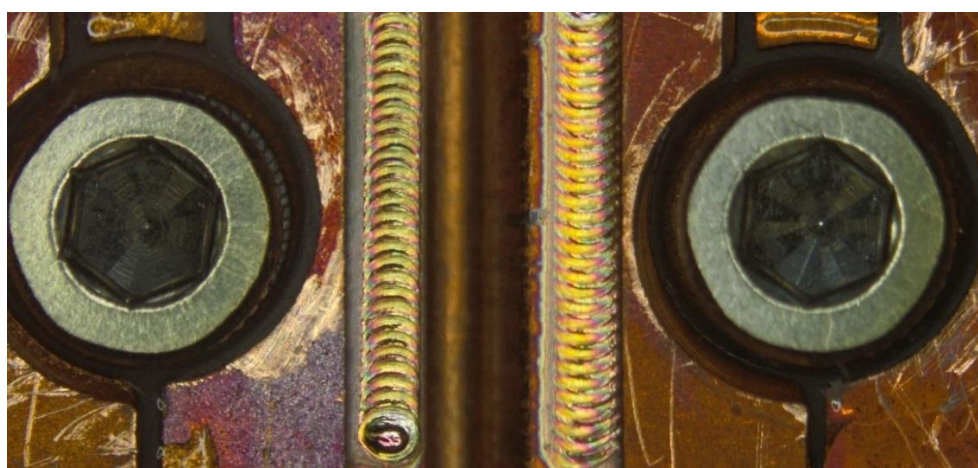
Diskové lasery mají rovněž pevnolátkové aktivní prostředí jako Nd:YAG, ale místo tyčového tvaru má aktivní prostředí diskového laseru tvar disku a Nd je nahrazen Yterbiem (Yb). Disk má průměr kolem 15 mm a šířku 0,2 mm. Výhodou tohoto tvaru je rovnoměrné chlazení a schopnost generovat velmi kvalitní laserový svazek o vysokých energiích.

Moderní výkonný diskový laser TruDisk 1020 je vhodný pro svařování mědi a dalších vysoce odrazných materiálů. Tento laser vyrábí společnost TRUMPF. Jedná se o laser generující kontinuální záření na vlnové délce 515 nm s průměrným výkonem 1 kW. TruDisk 1020 je vhodný i pro tenkostěnné měděné součásti a svařování elektroniky, protože jeho laserové záření v kontinuální režimu umožňuje svařovat kondukčním svařováním vysoce odrazné materiály [34] (obrázek 14). V pulzním režimu pracuje TruDisk Pulse s vrcholovým výkonem 4 kW a vlnovou délkou laserového svazku 515 nm. Pro svar vytvořený infračerveným pulzním laserem o vrcholovém výkonu 2,6 kW je u pulzního laseru generující záření o vlnové délce v oblasti 515 nm nutné použít pouze 1,4 kW [35]. Na obrázku 15 jsou zobrazeny měděné obrobky, na kterých byly tvořeny svary pulzním laserem TruDisk Pulse 421.



Obrázek 14: Kondukční svařování měděné fólie laserem TruDisk 1020.

Převzato z [34].

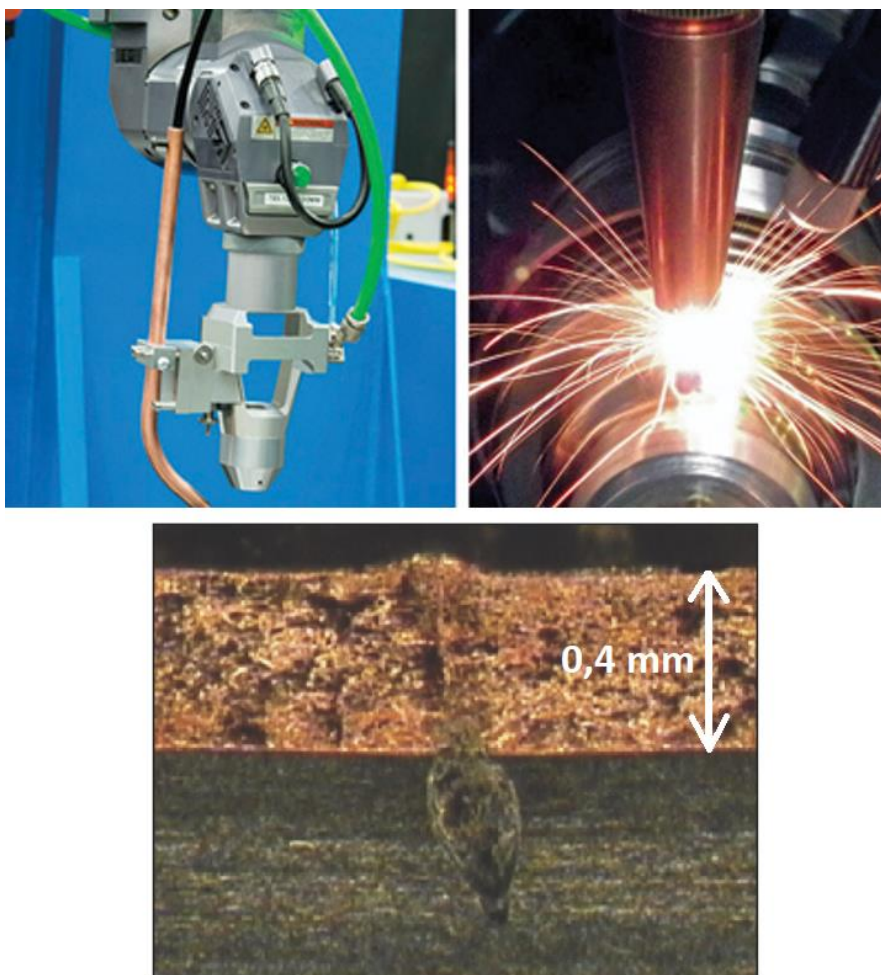


Obrázek 15: Dvě měděné vrstvy rozdílných tloušťek (0,2 mm a 0,3 mm) jsou svařeny diskovým pulzním laserem TruDisk Pulse 421 s vlnovou délkou 515 nm. Převzato z [35].

## 2.1.4 Vláknové lasery

Nově používaná technologie laserů jsou vláknové lasery. Aktivním prostředím je optické vlákno, typicky o délce (3–9) m o průměru (10–50)  $\mu\text{m}$ , dopované například ytteriem, erbiem nebo thuliem. Navázání optického vlákna do robotické části je velmi jednoduché. Buzení je prováděno přímo ve vlákně, a to blokem laserových diod. Kvalita svazku pro jednomodová optická vlákna je  $K < 0,8$ , pro multimodová vlákna bývá  $K = 0,5$ .

Vláknové lasery jsou schopny generovat záření o vlnové délce 532 nm, 1 070 nm, 1 100nm, 1 800 nm a 1 900 nm [36]. Pro kovové materiály se při běžných podmínkách dosahuje hloubky svaru přibližně 2 mm/kW. Pro CO<sub>2</sub> lasery je to přibližně 1 mm/kW. Vláknovým laserem o výkonu (15–30) kW bylo dosaženo 50 mm hloubky svaru [33], [36]. Vláknový laser a provedení přeplátovaného svaru mědi s ocelí s vláknovým laserem je zobrazeno na obrázku 16.



Obrázek 16: Robotická pracovní hlava vláknového laserového systému (nahore).

Převzato z [37]. Svar skrz 0,4 mm širokou měď s provařením do oceli při rychlosti svařování  $254 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Převzato z [38].

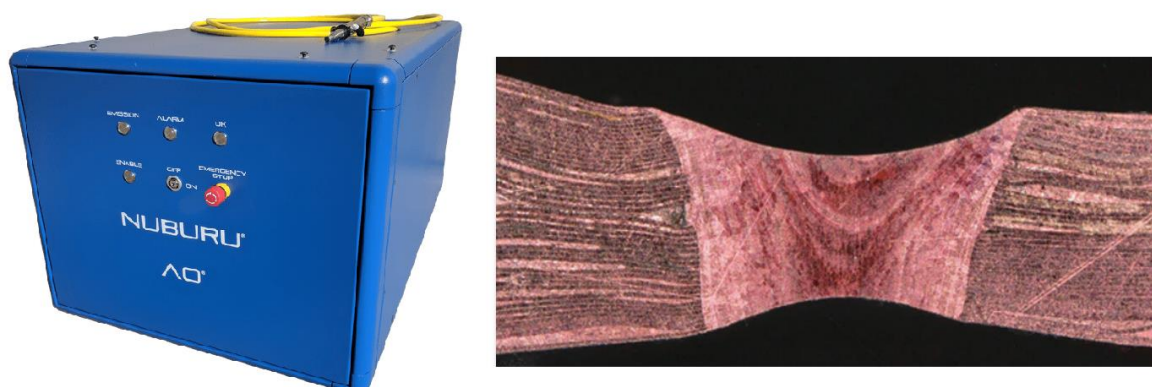
## 2.1.5 Diodové lasery

Aktivní prostředí diodových laserů je tvořeno P-N přechodem. Při rekombinaci elektron-díra se vytváří foton, který je nepolarizovaný a šíří se v náhodném směru (spontánní emise). Fotonem s velikostí energie energetického rozdílu hladin v materiálu dochází ke stimulované emisi. Nevýhodou je eliptický tvar svazku, který musí být následně upraven. Díky efektivitě diodových laserů a širokému výběru vlnové délky se používají i jako zdroj energie pro buzení pevnolátkových nebo vláknových laserů.

Diodové lasery se již vyrábí s výkonem 25 kW v rozsahu vlnových délek 900 nm do 1 080 nm, ale s horší kvalitou svazku. Laser s výkonem 7 kW od firmy Laserline má v ohnisku čočky  $F = 150$  mm průměr svazku  $d_{\text{foc}} = 450$   $\mu\text{m}$ , kdežto při výkonu 25 kW nabývá svazek průměru v ohnisku 3 mm.

První dostupný „modrý“ laser pro průmysl s výkonem 150 W byl představen firmou Nuburu v roce 2017. Nesl název AO-150. Laserový systém AO-150 generoval záření na vlnové délce 450 nm. Laserový svazek byl navázán do optického vlákna o průměru 200  $\mu\text{m}$ . Šířka svazku v ohnisku čočky  $F = 100$  mm byla  $d_{\text{foc}} = 100$   $\mu\text{m}$  s  $BBP = 15$  mm·mrad. Společnost Nuburu již vyvinula 500 W modrý laser AO-500 s průměrem optického vlákna 400  $\mu\text{m}$  a  $BBP < 30$  mm·mrad. Nyní jsou ve vývoji i modré lasery disponující výkonem 1 kW v kontinuálním režimu. Na obrázku 17 je zobrazen Nuburu laser AO-500 a mikrostruktura svaru 10  $\mu\text{m}$  širokého měděného obrobku, který byl svařen tímto laserem.

Laserové diody jsou vyráběny z nitridu galia. Větší množství diod je spojeno do jednoho laserového svazku a následně do optického vlákna. Vývoj modrého laseru je klíčový pro zlepšení schopnosti svařování mědi a jejích slitin [39], [40].



Obrázek 17: Nuburu laser AO-500 (vlevo). Převzato z [41]. Svar vytvořen Nuburu laserem AO-500 ve 10  $\mu\text{m}$  tlusté měděné fólii (vpravo). Převzato z [42].

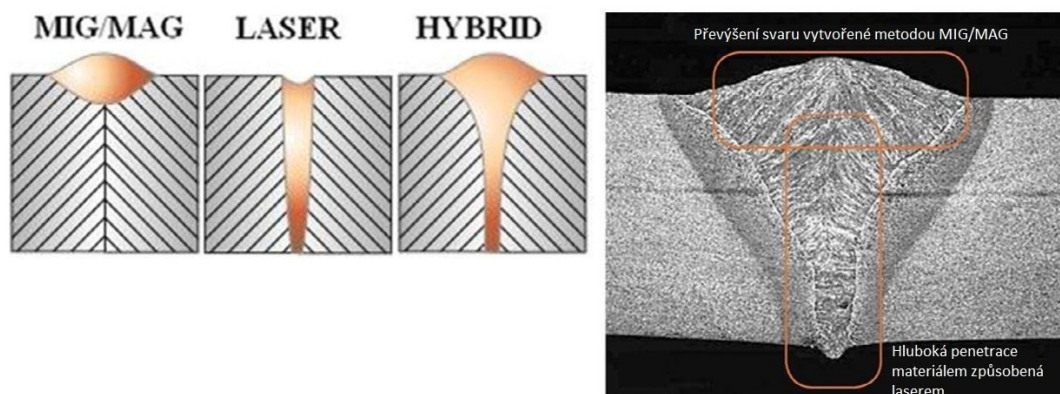
## 2.2 Laserové hybridní svařování

Kombinací dvou svařovacích procesů bylo vytvořeno hybridní svařování. V průmyslu se většinou kombinuje laserové svařování se svařováním elektrickým obloukem, a to přesněji s metodou MIG/MAG, PAW a TIG. Primárním tepelným zdrojem jsou většinou CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, vláknové a diodové lasery. Cílem hybridního svařování je kompenzovat nevýhody a nedostatky použitých metod.

Kombinací laserového svařování s metodou MIG/MAG bylo dosaženo snížení požadavku na přesně polohování, protože přídavný materiál u MIG/MAG metody vyplní spoj mezi svařenci. Naopak laserový svazek stabilizuje elektrický oblouk, zlepšuje vzhled svaru a snižuje jeho náchylnost k defektům [43]. Spojením těchto metod byl vytvořen hlubší svar s menším výskytem vzduchových pórů, které jsou problémem laserového svařování [5]. Porovnání svarů vytvořených metodou MIG, laserovým svářením a hybridním spojením těchto dvou metod je zobrazeno na obrázku 18.

U TIG hybridního laserového svařování slouží jako sekundární zdroj tepla elektrický oblouk a primární je opět laserové zařízení. Při svařování může být použit přídavný materiál. Při laserovém svařování dochází k vypařování materiálu, a to může způsobit pokrytí wolframové elektrody vrstvou oxidu. Díky vytvoření taveniny metodou TIG dochází ke zlepšení absorpce laserového svazku s následným snížením defektů ve svaru. Umístění laseru a elektrického oblouku metody TIG na opačné strany svaru může rapidně navýšit svařovací rychlost [36].

Spojení metody PAW s laserovým svařováním je velmi obdobné TIG hybridnímu laserovému svařování. Zásadní rozdíl je v umístění elektrody, která je u metody PAW chráněna a tvaru plazmového oblouku, který je u PAW metody intenzivnější.



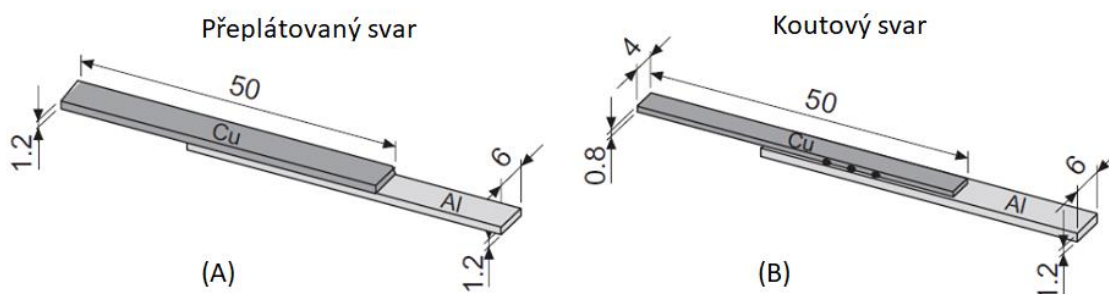
Obrázek 18: Schématické znázornění svarů (vlevo) a mikrostruktura svaru vytvořeného hybridní technologií laser-MIG/MAG (vpravo). Převzato a upraveno z [36].

## 2.3 Pokročilé metody svařování mědi a jejích slitin laserem

### 2.3.1 Mikro svařování mědi a hliníku

Zlepšení mechanických vlastností svarů bodového svařování bezkyslíkaté mědi s hliníkem Al-99,5 Nd:YAG laserem bylo zkoumáno v publikaci I. Myse a M. Schmidta [36]. Tři místa byla spojena na obrobcích po obou stranách. Přídavný materiál (nikl, stříbro nebo cín) ve formě tenké folie nebo galvanického pokovení s tloušťkou (3–100)  $\mu\text{m}$  byl použit na měď pro zlepšení vlastností svarů. Sestavení obrobků je ukázáno na obrázku 19.

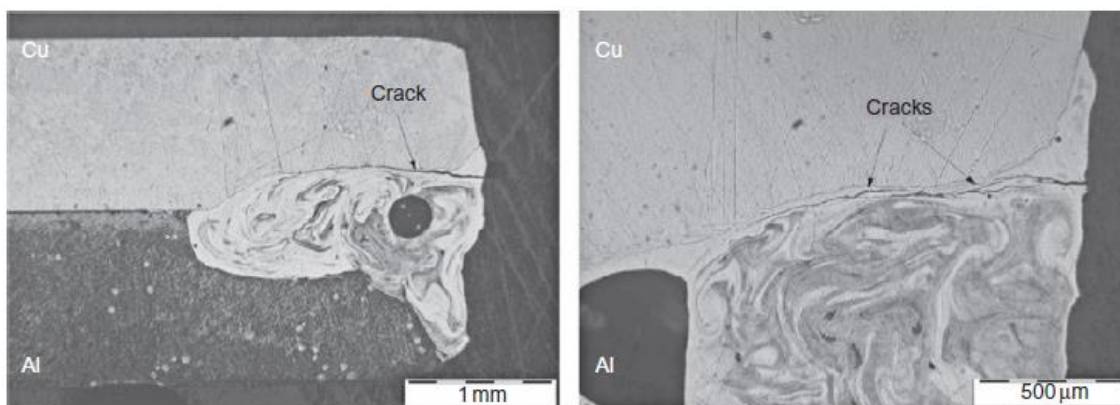
Zlepšení výsledků bylo dosaženo posunem laserového svazku na plochu hliníkového obrobku, a to přibližně o vzdálenost velikosti poloměru laserového svazku. Pevnost v tahu se přibližně zdvojnásobila po přidání mezivrstvy stříbra o tloušťce (25–50)  $\mu\text{m}$ . Taktéž úhel dopadu svazku mezi  $65^\circ$  až  $75^\circ$  zlepšuje kvalitu svaru. Obrázek 20 uvádí průřez svarem, na kterém je vidět výsledek různého tepelného tavení svařovaných materiálů. Ukázalo se, že mechanické vlastnosti svaru se zlepšovaly s navyšováním energií pulzu do okamžiku, dokud zde byla nepřetavená část hliníku. Při překročení této meze se mechanické vlastnosti svaru zhoršovaly. Prasklina, viditelná na obrázku 20, byla pravděpodobně vytvořena rychlým ochlazením svaru a rozdílnou tepelnou roztažností materiálů [36].



Obrázek 19: Překládaný svar (A) a překládaný svar s dodatečným koutovým svarem (B).

Převzato a upraveno z [36].





Obrázek 20: Průřez swarem Al-Cu vytvořeným s výkonem svazku 3 kW a délkou pulzu 9 ms. Převzato z [36].

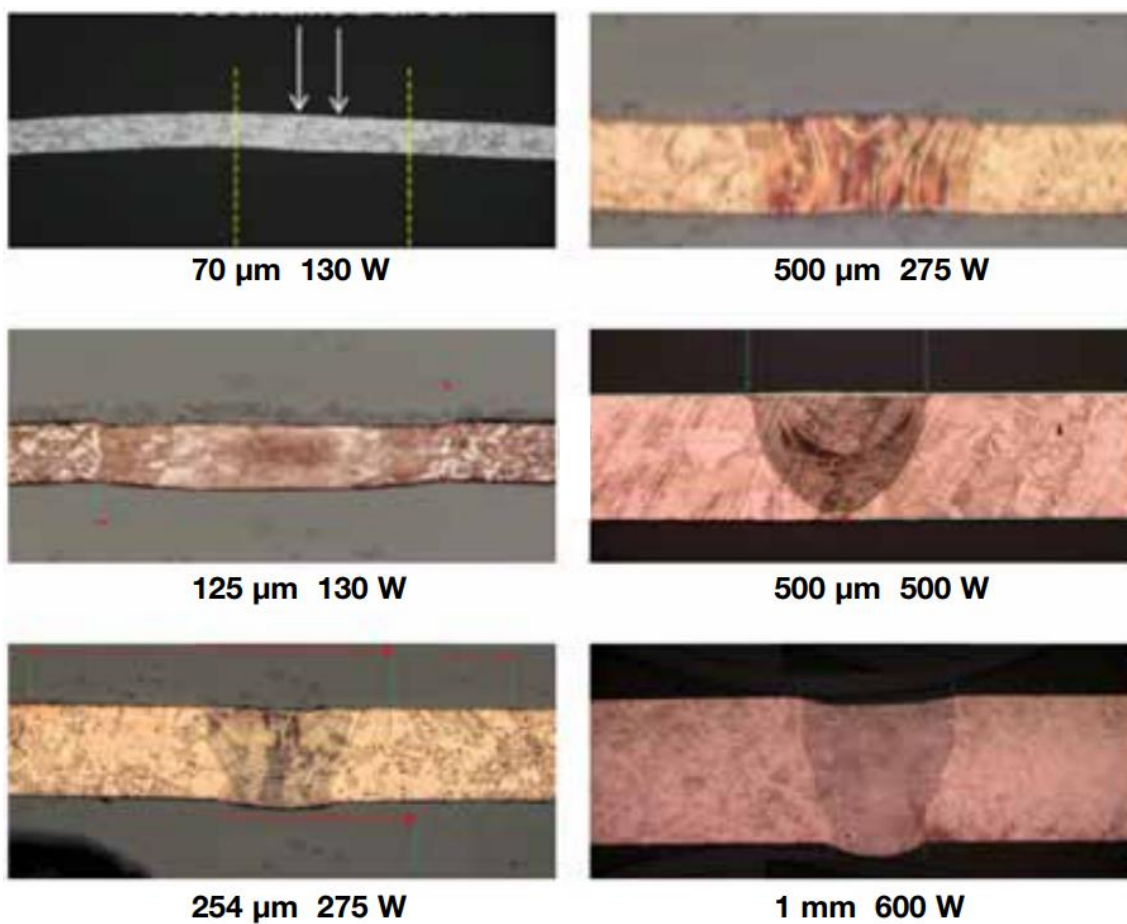
### 2.3.2 Svařování mědi modrým laserem

Svařování mědi moderním diodovým laserem bylo popsáno v publikacích [39], [40], [44]. Protože dochází k velkému navýšení absorpce s posunem od blízkého infračerveného záření do vlnové délky 450 nm, resp. modré, svary vykazují velmi dobré vlastnosti. Navýšení absorpce pro laserového záření v materiálu je zobrazeno v grafu na obrázku 11. Oproti laserům v infračervené oblasti se nemusí modré lasery omezovat pro hloubkové svařování (anglicky keyhole), ale je zde možnost i kondukčního svařování. Při svařování infračervenými lasery musí být do měděného obrobku dodána velká energie, protože se většina záření zpočátku odrazí. Při roztavení materiálu dochází k okamžitému nárůstu absorpce a při vyšších energiích také k vypařování materiálu. Vysoký tlak par může tak vytvořit bubliny v tavenině, které po ochlazení svarové lázně zůstanou uvězněny ve svaru a tím sníží jeho pevnost [44]. Modré lasery vytvoří stabilnější svarovou lázeň a tím kvalitnější svar.

Spojení odlišných materiálu může vytvořit intermetalické fáze a tím oslabit pevnost svaru. Zvýšením absorpce laserového svazku pro spojované rozdílné materiály může předejít vytvoření intermetalických fází. Tato problematika byla prozkoumána v publikaci pana Jean-Michela Pelaprata a kol. [39]. Překládaný svar 0,2 mm široké mědi a 0,2 mm nerezové oceli byl spojen 300 W modrým laserem (obrázek 21). Vytvořený svar obsahoval omezené množství intermetalických fází a defektů. Z též publikace ukázka velmi kvalitních svarů vytvořených modrým laserem na měděných obrobkách je na obrázku 22. Použitý výkon laseru byl (130–600) W s vlnovou délkou 450 nm. Svařovaná tloušťka mědi byla od 70 μm do 1 mm.



Obrázek 21: Přelátovaný svar mědi a nerezové oceli. Převzato z [39].



Obrázek 22: Mikrostruktura řezů tupých svarů měděných obrobků. Převzato z [39].

### 2.3.3 Porovnání svařování mědi infračerveným a zeleným laserem

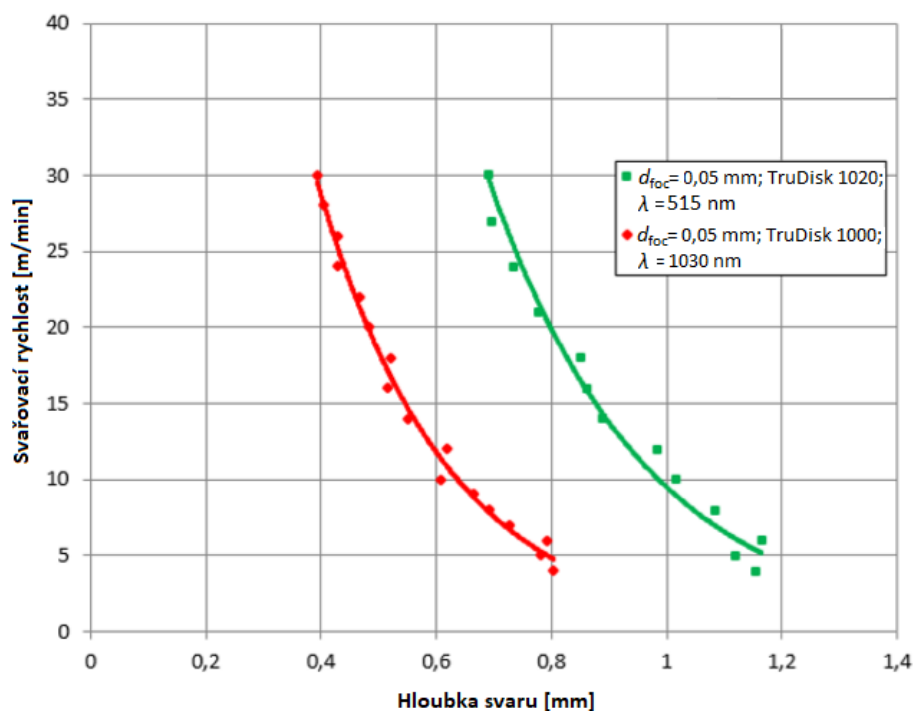
Jak již bylo zmíněno výše, absorpce laserového svazku v materiálu je vysoce závislá na vlnové délce záření. V roce 2018 vyšla publikace pod vedením Elke Kaiser, kde bylo porovnáno svařování mědi diskovými lasery TruDisk 1000 a TruDisk 1020, které vyrábí firma TRUMPF [45]. Jedná se o diskové lasery generující záření v infračervené a v zelené oblasti vlnové délky. Technické údaje těchto laserů jsou uvedeny v tabulce 6.

Při experimentu byly vytvořeny lineární svary. Použitý výkon laserů při svařování byl konstantní, a to 1 kW. Povrch obrobků byl umístěn v ohniskové rovině laserového svazku. Byla pozorována závislost hloubky svaru na svařovací rychlosti. Porovnání obou laserů při svařování je uvedeno v grafu na obrázku 23, kde je viditelný posun hloubky svaru pro TruDisk 1020 oproti TruDisk 1000 při stejné svařovací rychlosti. V práci bylo taktéž prokázáno, že problém tepelné vodivosti mědi není vyřešen zkrácením vlnové délky. Ukázalo se, že se zvětšující se tloušťkou materiálu se snižuje hloubka penetrace laserem. Vysvětlením je vysoká tepelná vodivost mědi [45].

Tabulka 6: Technické parametry laserů TruDisk 1000 a TruDisk 1020.

Převzato a upraveno z [45].

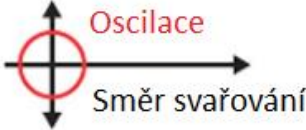

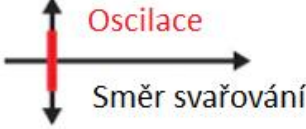

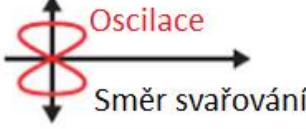

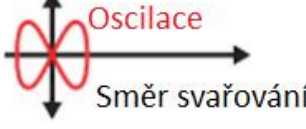
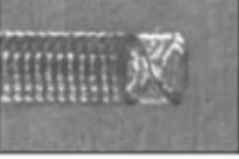
Parametry	TruDisk 1000	TruDisk 1020
Průměrný výkon	1 kW	1 kW
Vlnová délka	1030 nm	515 nm
Délka pulzu	kontinuální	kontinuální
Průměr optického vlákna laseru	50 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Počet výstupů	max 2	max 2
BPP	2 mm·mrad	2 mm·mrad
Účinnost	33 %	25 %



Obrázek 23: Graf závislosti dosažené hloubky svaru na svařovací rychlosti pro lasery TruDisk 1000 (červený) a TruDisk 1020 (zelený). Převzato a upraveno z [45].

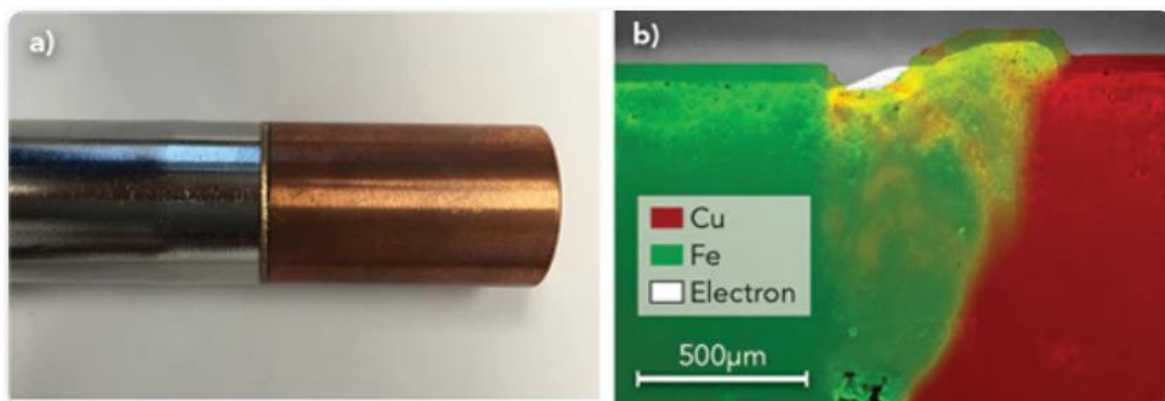
### 2.3.4 Metoda oscilace laserového svazku (wobbling)

Jelikož donedávna byly v průmyslu používány pro svařování mědi lasery generující záření v infračervené oblasti, byly vyvíjeny nové metody a technologie pro zlepšení absorpce laserového svazku v materiálu a zkvalitnění struktury svaru. Do těchto metod patří i oscilace laserového svazku (anglicky wobbling). Princip metody spočívá v rozkmitání svazku systémem vychylovacích zrcadel [46]. Na obrázku 24 jsou uvedeny příklady geometrií drah oscilací laserového svazku. Při použití této metody dochází k lepší rozložení teploty a zvětšení svarové lázně. Tímto je omezena tvorba plazmatu nad svarem a dochází k vytvoření stabilnější kapiláry nežli u klasického lineárního posunu laserové hlavy. Množství intermetalických fází vytvořených mezi dvěma rozdílnými materiály je touto metodou taktéž možné snižovat (obrázek 25).

Typy oscilací	Schématické znázornění	Vzorky svarů
Kruhový		
Lineární		
Osmička		
Nekonečno		

Obrázek 24: Schématické znázornění různých typů oscilace svazku.

Převzato a upraveno z [47].



Obrázek 25: Svar oceli a hliníku vytvořený kruhovou oscilací svazku a) a EDS snímek tohoto svaru b). Převzato z [47].

Kruhová, resp. eliptická oscilace svazku na ETP mědi byla zkoumána v disertační práci D. F. Franca [48]. V experimentu byl použit kontinuální yterbium vláknový laser IPG YLS 5000 CW s maximálním výkonem 5 kW na vlnové délce 1070 nm. Jednou ze zkoumaných částí v práci bylo zjištění závislosti hloubky svaru na překrytí kruhových, resp. eliptických geometrií.

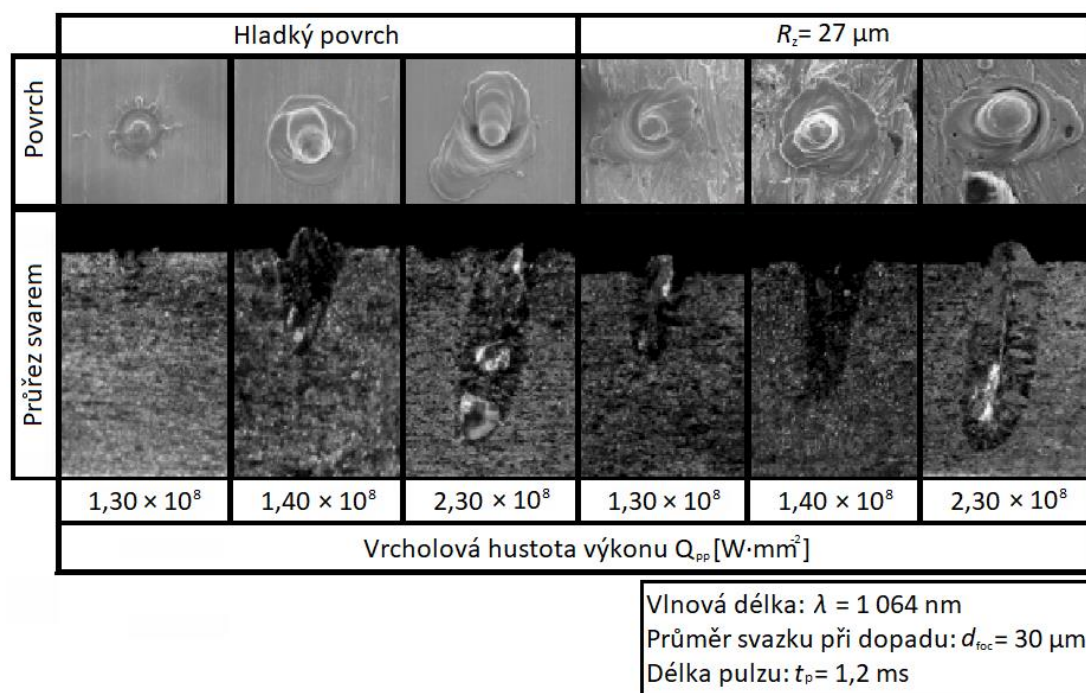
V první části bylo zvětšeno překrytí navýšením průměru elipsy v ose x, tedy v ose pohybu laserové hlavy. Konstantní zůstala frekvence otáčení a rychlost svařování při

kontinuálním výkonu laseru 4 kW. Po mikroskopickém přiblížení svaru se ukázalo, že navyšováním překrytí se snižovala hloubka penetrace. S nižším překrytím se vytváří kapilára, ale s jeho navyšováním dochází ke kondukčnímu svařování. V další části experimentu bylo překrytí navýšeno zvětšením frekvencí otáčení. Výsledek byl stejný jako v předcházejícím pokusu [48].

### 2.3.5 Závislost absorpce laserového svazku na drsnosti povrchu

Zlepšení absorpce laserového svazku Nd:YAG laseru s vlnovou délkou 1 064 nm v měděném obrobku bylo experimentálně zkoušeno a popsáno v publikaci M. R. Maina a kol. [49]. Bylo zjištěno, že k nejvyšší absorpci laserového svazku dochází právě opakovanými odrazy svazku uvnitř kapiláry. Uvažovalo se proto, že k navýšení absorpce může dojít na stěnách konkávního otvoru podobnému kapiláře. Použitý materiál v této práci byla bezkyslíkatá měď C1020, která vykazuje vysokou odrazivost pro použitou vlnovou délku a velkou tepelnou vodivost. Obrobek byl uzavřen v dusíkové atmosféře, aby se předešlo oxidaci.

Bylo zjištěno, že k nejvyššímu navýšení absorpce a objemu roztaveného materiálu dochází při drsnosti povrchu  $R_z = 27 \mu\text{m}$ . Na obrázku 26 jsou vyobrazeny svary, závislost jejich tvaru a mikrostruktury na drsnosti povrchu a plošné hustotě vrcholového výkonu  $Q_{pp}$ .



Obrázek 26: Porovnání svarů vytvořených na plochem povrchu a povrchu s vyšší drsností při různé plošné hustotě výkonu. Převzato a upraveno z [49].

### 3 Experiment

Následující kapitola obsahuje popis použitých materiálů a také vysvětluje nastavení experimentu. V první kapitole 3.1 je uveden materiál, který byl svařován laserovým systémem. Následuje kapitola 3.2 s popisem použitých zařízení, tedy laserový systém Nd:YAG KLS 246 - 102, který byl použit pro vytvoření svarových spojů a mikroskopu LEXT OLS5000, díky kterému byla zobrazena mikrostruktura svarů. Dále byl pro měření profilu povrchu použit kontaktní profilometr Form Talysurf Series 2. Provedení experimentu je popsáno v kapitole 3.3.

#### 3.1 Materiál

Pro experiment byl použit cínový bronz CuSn8 C52100, dále jen už CuSn8, který byl svařován laserovým systémem KLS 246 - 102. CuSn8 má příměs fosforu a jak již bylo zmíněno výše, přidáním fosforu získává materiál vlastnost deoxidace. CuSn8 se tedy vyznačuje odolností proti korozi a velmi vysokou pevností. CuSn8 má nejmenší elektrickou vodivost mezi 4 % až 8 % cínovými bronzemi [50]. Používá se pro namáhané strojní součástky, například pružiny. Přesné chemické složení CuSn8 je uvedeno v tabulce 7. Struktura základního materiálu je vyobrazena na obrázku 27.

Tabulka 7: Chemické složení CuSn8. Převzato z [51].

Prvek	Sn	P	Cu
Obsah [hm. %]	7,5-8,5	0,01-0,4	zbytek



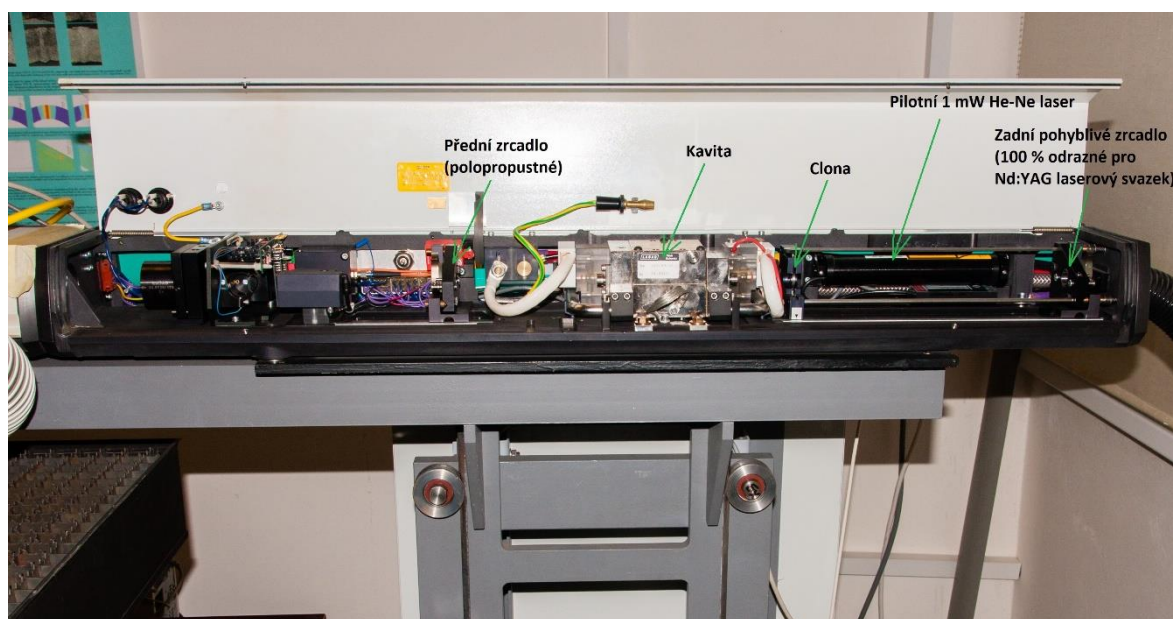
Obrázek 27: Struktura základního materiálu CuSn8. Fotografie pořízena konfokálním mikroskopem LEXT OSL5000.

## 3.2 Zařízení

### 3.2.1 Laserový systém KLS 246 - 102

Pro svařování CuSn8 byl použit pulzní pevnolátkový laser Nd:YAG KLS 246 - 102, dále jen KLS 246. Výrobce je firma LASAG, která je nyní součástí firmy COHERENT. KLS 246 generuje záření o vlnové délce 1 064 nm. Aktivní prostředí je tyčinkový krystal o průměru  $d_{akt} = 6$  mm a délce  $l_{akt} = 150$  mm. Rezonátor se skládá ze dvou rovinných zrcadel, z toho je zadní zrcadlo pohyblivé. Délku rezonátoru  $L$  je nastavitelná od 530 mm do 730 mm. Průměrný výkon  $P$  je 150 W a maximální energií pulzu  $E$  až 30 J. Frekvence pulzů  $f$  se pohybuje v intervalu (0,1–1000) Hz s délkou pulzu  $t_p$  (0,1–20) ms. Otevřený stabilní rezonátor laserového systému KLS 246 - 102 je zobrazen na obrázku 28.

Pro snímání polohy byl použit laserový snímač RF 603, který sloužil pro přesné stanovení polohy na vertikální ose. Ochranný plyn při svařování nebyl při experimentech použit.



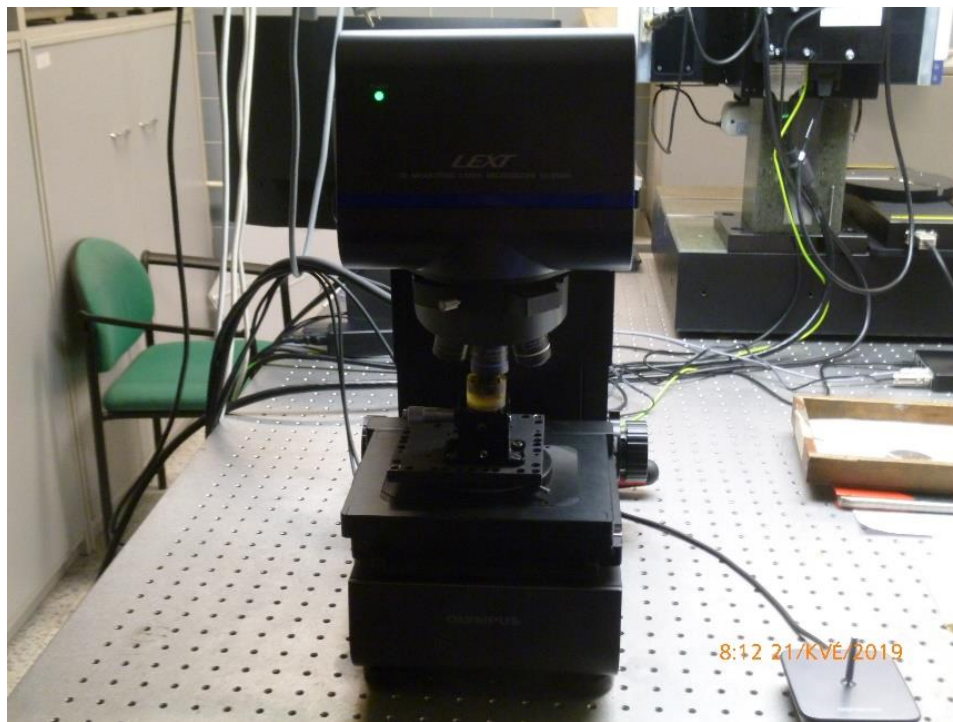
Obrázek 28: Popis rezonátoru laserového systému KLS 246 - 102.

### 3.2.2 Laserový rastrovací konfokální mikroskop LEXT OLS5000

Pro zobrazení mikrostruktury svarů byl použit mikroskop LEXT OLS5000 (obrázek 29) od firmy Olympus. Jedná se o laserový rastrovací konfokální mikroskop. Pozorovaný objekt je bodově osvětlován laserovým svazkem fokusovaným přes bodovou



clonku. Laserový svazek se odráží od sledovaného objektu a dopadá na snímač. Jelikož se jedná o bodové osvětlení, posun je přesně definovaný a s počítačovým zpracováním může být vytvořen 3D snímek. LEXT OLS5000 je vybaven objektivem 5x, 10x, 20x, 50x, 100x. Výrobce uvádí rozlišení 0,5 nm. Podrobnější informace nalezneme na [52].

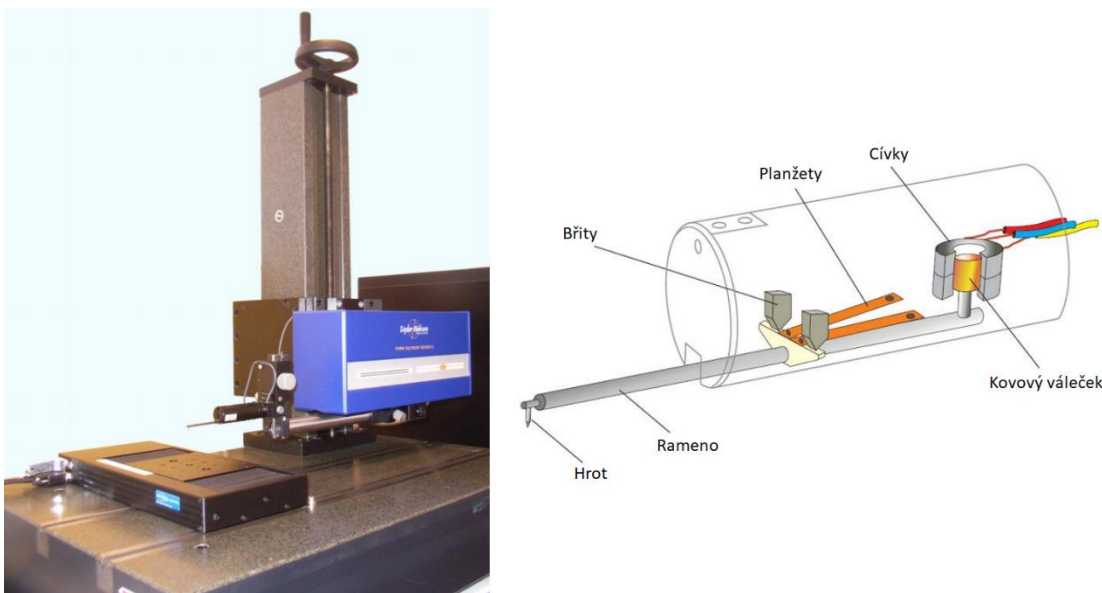


Obrázek 29: Konfokální mikroskop LEXT OLS5000.

### 3.2.3 Kontaktní profilometr Form Talysurf Series 2

Form Talysurf Series 2 je kontaktní profilometr od firmy Taylor Hobson. Slouží pro měření vlastností povrchu, jako je drsnost, sklon, ale také geometrie pevných těles. Výstupní zobrazení může být 2D i 3D.

Kontaktní profilometr funguje na indukčním principu. Na pohyblivém stolku je umístěn vzorek a nad vzorkem se pohybuje rameno s hrotem, který snímá povrch. Hrot je umístěn na konci ramene. Na druhém konci ramene jsou dvě cívky, uvnitř kterých je umístěn kovový váleček (kotva). Pohybem ramene ve vertikální ose způsobuje pohyb válečku uvnitř cívky a tím se indukují elektrický proud [53]. Na obrázku 30 je vyobrazen Form Talysurf Series 2 a kontaktní indukční snímač.



Obrázek 30: Form Talysurf Series 2 (vlevo) a kontaktní indukční snímač s popisem funkčních součástí (vpravo). Převzato a upraveno z [53].

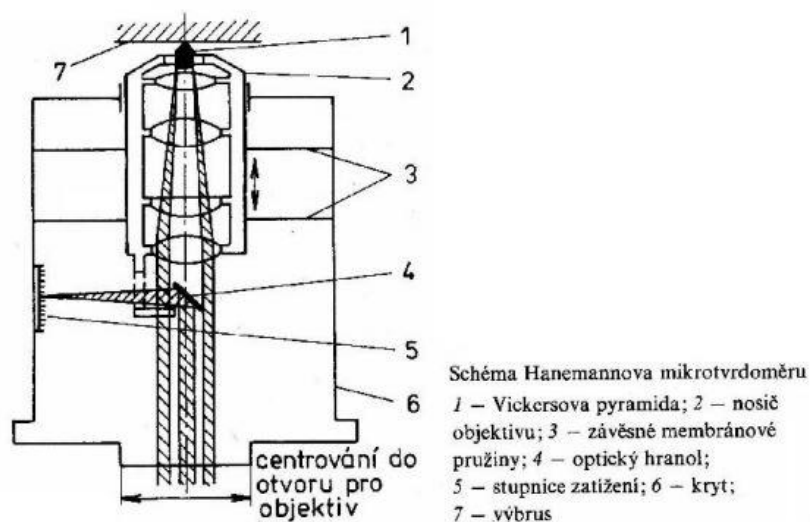
### 3.2.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse patří do statických zkoušek. Využívá se čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem stěn  $136^\circ$ . Diamantový jehlan se vtlačuje klidnou silou do povrchu materiálu. Tvrdost podle Vickerse značíme HV, pro kterou platí vzorec

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}], \quad (1)$$

kde  $F$  je zátěžná síla a  $u$  je průměrná hodnota úhlopříčky [54].

Hanemannův mikrotvrdoměr využívá Vickersova čtyřbokého jehlanu (obrázek 31). Vickersův jehlan je umístěn ve speciálním objektivu, jenž je zavěšen na cejchovaných pružinách. Vzorek je umístěn na stolku pod mikroskopem. Při přibližování vzorku k objektivu se jehlan vtlačuje do materiálu a prohnutí pružin ve směru optické osy odpovídá zatížení působící na jehlan. Zatížení se měří na stupnici, která se nachází uvnitř objektivu [54], [55].



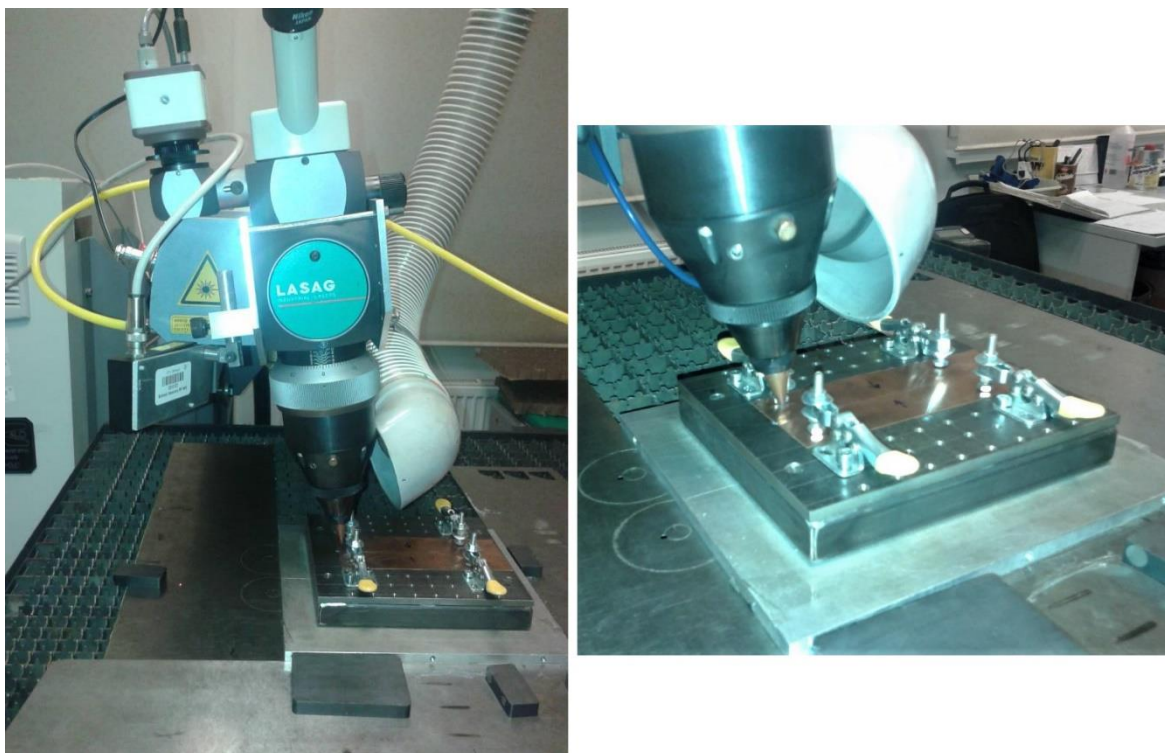
Obrázek 31: Hanemannův mikrotvrdoměr. Převzato z [54].

### 3.3 Provedené experimenty

Cílem experimentu byla ukázka vybraných metod pro svařování mědi a jejích slitin laserovým systémem KLS 246 - 102. Těmito metodami byly vytvořeny tupé svaru typu I. Na začátku bylo nutno stanovit optimální energii a délka pulzu svazku, frekvenci pulzů a rychlost posuvu pracovního stolu vůči laserové hlavě pro optimální svařování plechu CuSn8. Kromě klasického lineárního relativního posuvu laserové hlavy nad spárou obrobků byla provedena simulace metody oscilace svazku. Taktéž bylo provedeno svařování se změnou drsnosti povrchu. Vybrané vzorky svarů byly připraveny pro optickou metalografii.

#### 3.3.1 Příprava vzorků pro svařování

Plíšky CuSn8 o tloušťce 0,31 mm byly nastříhány přibližně v rozměrech (130 × 33) mm. Všechny obrobky byly před svařováním očištěny technickým lihem. Jelikož se jednalo o tupý svar, spojované strany byly opracovány na fríze, aby plochy spojovaných stran k sobě dolehly. Vzorky byly uchyceny na svařovací přípravek miniaturními rychloupínky 100 UR (obrázek 32).



Obrázek 32: Obrobky uchyceny na přípravku a připraveny pro svařování laserem.

### 3.3.2 Optimální nastavení parametrů laseru

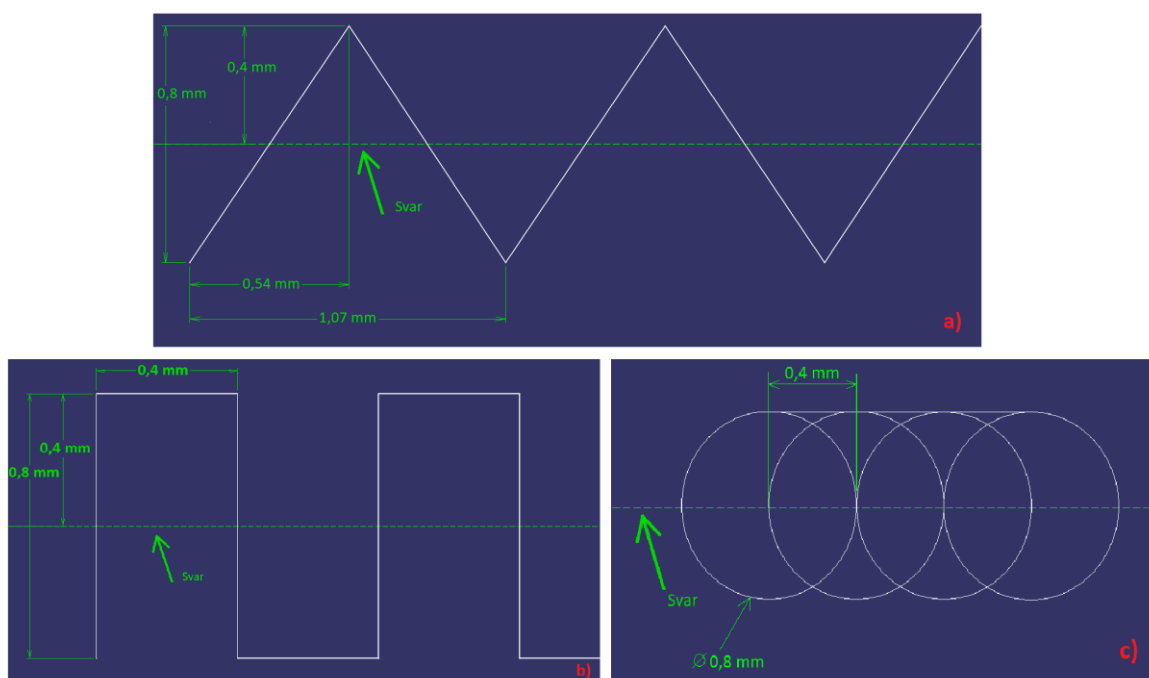
Laserem byly vytvořeny tupé svary na CuSn8 pro zjištění optimálních parametrů. Rezonátor laseru KLS 246 byl nastaven na délku  $l_{rez} = 530$  mm s clonou  $D_{clona} = 5,8$  mm. Pro toto nastavení odpovídá  $BPP = 22$  mm·mrad. KLS 246 je Nd:YAG pulzní laser, proto z počátku experimentu bylo nutno stanovit překrytí pulzů  $pp$  a jejich frekvenci  $f$ . Překrytí pulzů bylo 80 % a frekvence pulzů  $f = 13$  Hz. Vzdálenost obrobků od ohniska svazku byla  $z = 3$  mm, z důvodu ochrany optických prvků v pracovní hlavě před zpětnými odrazy byla pracovní hlava nakloněna o  $10^\circ$  od svislého směru. Průměr svazku ve vzdálenosti od ohniska  $z = 3$  mm je roven průměru  $d_z = 0,84$  mm. Pro tyto předpoklady rychlost svařování odpovídá hodnotě  $v = 2$  mm·s<sup>-1</sup>. Tyto parametry byly ve všech experimentech konstantní. Změnou délky pulzu  $t$  a budícím napětím  $U$  byl měněn vrcholový výkon  $P_p$  laserového svazku. Vstupní a výstupní strana vytvořených svarů byla prohlédnuta pod světelným mikroskopem MB MIKR 300. Po vyhodnocení byl vybrán svar, který nevykazoval rozstřík, propal skrz materiál a další charakteristiky, které by snížily pevnost svaru.

V další části tohoto experimentu byly jako výchozí hodnoty použity parametry, kterými byl vytvořen subjektivně nejlepší svar z předchozí části. Následně bylo vytvořeno 9 svarů, kdy pro každý svar bylo průběžně zvyšováno napětí o 2 V. Vytvořené svary byly opět prohlédnuty pod světelným mikroskopem a změřen průměr stopy laserového svazku na

vstupní  $d_{Bin}$  a výstupní  $d_{Bout}$  straně svaru. Byly vybrány taktěž vzorky pro analýzu mikrostruktury řezu svaru mikroskopem LEXT a změření profilu povrchů kontaktním profilometrem Talysurf. Parametry nastavení laseru pro svar, který vykazoval nejlepší vlastnosti, byly použity jako výchozí pro další experimenty.

### 3.3.3 Metoda svařování s oscilací laserového svazku

Metoda s oscilací svazku se prováděla ve třech provedeních. Jelikož KLS 246 nemá vychylovací zrcadla pro rozkmitání svazku, všechny pohyby provádí lineární osy pracovního stolu. V prvním provedení byl vytvořen pilovitý tvar svaru, cílem druhého provedení bylo vytvořit obdélníkový tvar svaru a v posledním třetím provedení byl vytvořen spirálový tvar svaru. Geometrie pro vytvoření pilového, obdélníkového a spirálového tvaru svaru jsou ukázány na obrázku 33. Výchozím nastavením laseru pro všechny typy oscilací svazku byly zvoleny parametry vybraného svaru z předchozí části experimentu. Snižováním čerpacího napětí o jednotky voltů se zmenšovala energie pulzu tak, aby tato změna odpovídala hodnotě 0,2 J. Vyhodnocení svarů zahrnovalo analýzu pod světelným mikroskopem MB MIKR 300 a konfokálním mikroskopem LEXT, dále měření profilu povrchů kontaktním profilometrem Talysurf. Pro svary, které byly vytvořeny pilovitým tvarem oscilace svazku, byl změřen průměr stopy svazku na vstupní  $d_{Pin}$  a výstupní  $d_{Pout}$  straně svaru.



Obrázek 33: Ukázka metod s oscilací svazku pilovitého tvaru a), obdélníkového tvaru b) a kruhového tvaru c).

### 3.3.4 Změna drsnosti povrchu

Dle doporučení z publikace M. R. Maina a kol. byl povrch obroušen SiC brusným papírem značky Struers o zrnitosti P800 [49]. Na obrobcích bylo vytvořeno 8 svarů. Výchozí parametry byly převzaty z vybrané svaru v kapitole 3.3.2. Přesná změna energie pulzu byla nastavována budícím napětím tak, aby pro každý svar byla zmenšena energie o 0,2 J. Pod měřícím světelným mikroskopem byl změřen průměr stopy svazku na vstupní  $d_{Rin}$  a výstupní  $d_{Rout}$  straně svaru.

### 3.3.5 Přípravky pro optickou metalografii svarů

Příprava vzorků pro optickou metalografii zahrnuje několik po sobě jdoucích postupů. Nejdříve byla vybrána metoda, která je vhodná pro materiál CuSn8.

Svar se musí separovat, aniž by došlo k ovlivnění porušení struktury. Vzorek o velikosti (15 × 15) mm byl vystřižen a vložen do multisvorcky Struers. Následně byl vzorek vložen do zalévací formičky tak, aby zkoumaná plocha byla v kontaktu se dnem. Pro zalití se použila epoxidová pryskyřice SpeciFix Resin smíchaná se SpeciFix-20 Curing Agent (26 ml : 5 ml objemový poměr). Výrobky jsou od firmy Struers. Po zatvrzení byl vzorek vyjmut a připraven k dalšímu technologickému procesu, broušení.

Celý proces broušení se skládá z hrubého broušení a jemného. Postup pro hrubé broušení byl následující. Na otočný kotouč byly připevněny SiC brusné papíry značky Struers se zrnitostí v následujícím pořadí P80, P180, P320, P600, P800, P1200. Při broušení se pohyboval kotouč po vzorku pouze jedním směrem. Se změnou brusného papíru se směr pohybu změnil, a to kolmo na předcházející pohyb. Oplachování a kontrola pod světelným mikroskopem byla vykonávána průběžně po celou dobu procesu. Jemné broušení bylo prováděno s MD-plátnem a DiaPro diamantovou suspenzí od firmy Struers. Nejdříve bylo připevněno MD-Mol plátno na otočný kotouč a použita diamantová suspenze DiaPro Sat, 6 μm. Po přebroušení následovalo použití plátna MD-Nap s DiaPro Dac, 3 μm a MD-Nap s DiaPro Nap R, 1 μm. Změna pohybu byla stejná jako v předchozím hrubém broušení.

Po hrubém a jemném broušení následovalo leštění povrchu. Pro leštění bylo použito plátno MD-Chem se suspenzí OP-S NonDry, 0,04 μm, od firmy Struers. Suspenze byla smíchaná s 3% peroxidem vodíku. V tomto případě nezáleželo na směru pohybu leštění.

Před ukončením tohoto technologického postupu byla vyvolána mikrostruktura leptáním. Jednalo se o chemické leptání kyselinou dusičnou s ionizovanou vodou v poměru 1:1 po dobu 1 minuty.

## 4 Výsledky

### 4.1 Pracovní parametry laseru v experimentální části

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3.2, nejdříve bylo nutno nastavit vhodné parametry laseru pro svařování CuSn8. 5 svarů bylo vytvořeno se změnou parametrů, kterými byly délka pulzu a budící napětí (série svarů A). V následující tabulce 8 jsou uvedeny parametry použité pro sérii svarů A.

Tabulka 8: Nastavení parametrů laseru pro svary série A

$f = 13 \text{ Hz}, v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, z = 3 \text{ mm}, d_z = 0,84 \text{ mm}, pp = 80 \%$					
Označení svarů	$t$ [ms]	$E$ [J]	$U$ [V]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5$ [W·cm <sup>-2</sup> ]
A1	1	2,23	250	2,23	4,02
A2	2	4,86	250	2,43	4,38
A3	3	7,19	250	2,40	4,32
A4	2	7,00	290	3,50	6,32
A5	2	7,00	290	3,50	6,32

V další části experimentu popsaného v kapitole 3.3.2 byly použity jako výchozí parametry laseru hodnoty pro svar A4. Následně bylo vytvořeno 9 svarů (série svarů B). Budící napětí bylo navyšováno po 2 V, ostatní parametry byly ponechány konstantní. V tabulce 9 jsou uvedeny zvolené parametry pro svary série B. Dále byl změřen průměr stopy svazku na vstupní straně a výstupní straně svarů série B.

Tabulka 9: Nastavení parametrů laseru pro svary série B

$f = 13 \text{ Hz}, v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, t = 2 \text{ ms}, z = 3 \text{ mm}, d_z = 0,84 \text{ mm}, pp = 80 \%$						
Označení svarů	$U$ [V]	$E$ [J]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5$ [W·cm <sup>-2</sup> ]	$d_{\text{Bin}}$ [mm]	$d_{\text{Bout}}$ [mm]
B1	290	7,2	3,60	6,50	0,76	0,52
B2	292	7,3	3,65	6,59	0,78	0,64
B3	294	7,5	3,75	6,77	0,79	0,68
B4	296	7,6	3,80	6,86	0,79	0,50
B5	298	7,8	3,88	7,04	0,78	0,37
B6	300	7,9	3,93	7,13	0,78	0,38
B7	302	8,0	4,00	7,22	0,82	0,53
B8	304	8,2	4,10	7,40	0,82	0,49
B9	306	8,4	4,20	7,58	0,81	0,62

Použité nastavení parametrů laseru pro oscilace laserového svazku (kapitola 3.3.3) je uvedeno v tabulkách 10, 11 a 12. Pro následující experimenty byly výchozími parametry laseru nastaveny hodnoty ze série svarů B, a to konkrétně svaru B2. Budícím napětím jsme snižovali energii pulzu o 0,3 J. Pro pilovitý a spirálový tvar bylo vytvořeno 5 svarů, obdélníkovou oscilací laserového svazku byly vytvořeny 4 svary. Pro pilovitý tvar oscilace svazku byl změřen průměr stopy svazku na vstupní a výstupní straně svaru. Realizace této metody měla za úkol ukázat případné změny ve svaru ve srovnání se svarem lineárním.

Tabulka 10: Parametry laseru pro metodu oscilace svazku (pilovitý tvar)

$f = 13 \text{ Hz}$ , $v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $t = 2 \text{ ms}$ , $z = 3 \text{ mm}$ , $d_z = 0,84 \text{ mm}$ , $pp = 80 \%$						
Označení svarů	$E$ [J]	$U$ [V]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}]$	$d_{Pin}$ [mm]	$d_{Pin}$ [mm]
P1	7,3	295	3,65	6,59	0,71	0,64
P2	7,0	290	3,50	6,32	0,67	0,55
P3	6,7	285	3,35	6,05	0,63	0,52
P4	6,4	280	3,20	5,77	0,58	0,30
P5	6,1	275	3,05	5,50	0,58	0,20

Tabulka 11: Parametry laseru pro metodu oscilace svazku (obdélníkový tvar)

$f = 13 \text{ Hz}$ , $v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $t = 2 \text{ ms}$ , $z = 3 \text{ mm}$ , $d_z = 0,84 \text{ mm}$ , $pp = 80 \%$				
Označení svarů	$E$ [J]	$U$ [V]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}]$
O1	7,3	294	3,65	6,59
O2	7,0	289	3,50	6,32
O3	6,7	284	3,35	6,05
O4	6,4	279	3,20	5,77

Tabulka 12: Parametry laseru pro metodu oscilace svazku (spirálový tvar)

$f = 13 \text{ Hz}$ , $v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $t = 2 \text{ ms}$ , $z = 3 \text{ mm}$ , $d_z = 0,84 \text{ mm}$ , $pp = 80 \%$				
Označení svarů	$E$ [J]	$U$ [V]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}]$
S1	7,3	292	3,65	6,59
S2	7,0	287	3,50	6,32
S3	6,7	282	3,35	6,05
S4	6,4	274	3,20	5,77
S5	6,1	270	3,05	5,50



V následující tabulce 13 jsou uvedeny parametry laseru pro experiment popsaný v kapitole 3.3.4, v němž bylo cílem pozorovat závislost hloubky penetrace na energii pulzu se změnou drsnosti povrchu. Celkem bylo vytvořeno 8 svarů (série svarů R). Jako výchozí hodnoty parametrů byly použity hodnoty pro svar B3. Pro každý svar byla snížena energie budícím napětím o 0,2 J.

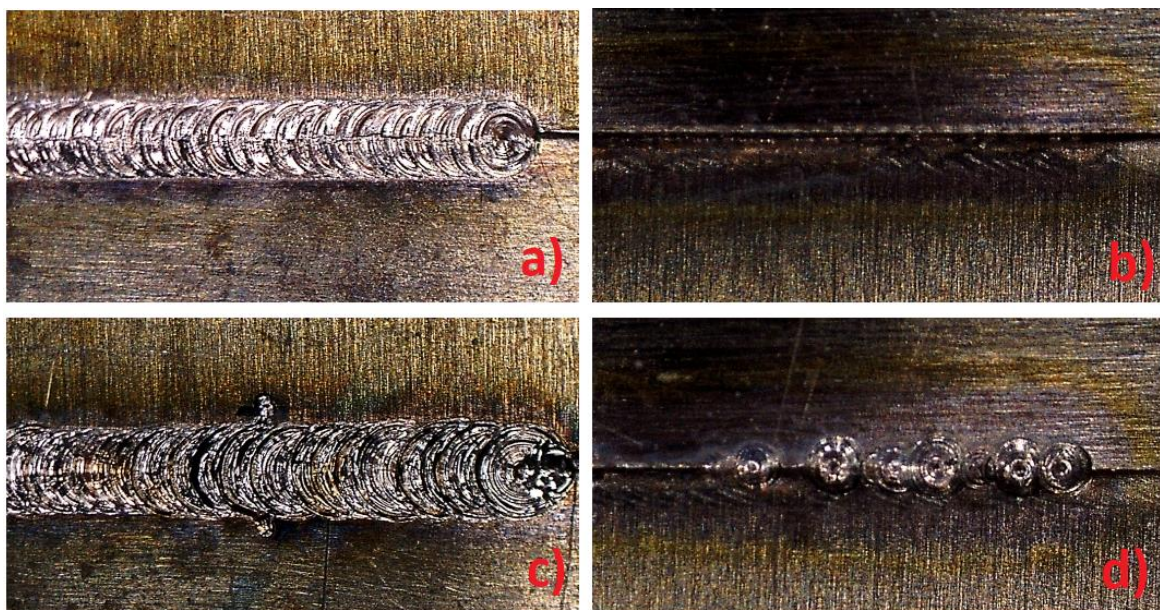
Tabulka 13: Parametry laseru pro experiment změny drsnosti povrchu

$f = 13 \text{ Hz}$ , $v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $t = 2 \text{ ms}$ , $z = 3 \text{ mm}$ , $d_z = 0,84 \text{ mm}$ , $pp = 80 \%$						
Označení svarů	$E$ [J]	$U$ [V]	$P_p$ [kW]	$Q_{pp}$ $10^5 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}]$	$d_{\text{Rin}}$ [mm]	$d_{\text{Rout}}$ [mm]
R1	7,5	293	3,75	6,77	0,70	0,66
R2	7,3	290	3,65	6,59	0,68	0,64
R3	7,1	287	3,55	6,41	0,70	0,66
R4	6,9	283	3,45	6,23	0,60	0,31
R5	6,6	279	3,30	5,95	0,58	0,29
R6	6,4	275	3,20	5,77	0,58	0,22
R7	6,2	271	3,10	5,59	0,60	0,16
R8	6,0	268	3,00	5,41	0,60	neprovařeno

## 4.2 Analýza povrchů svarů

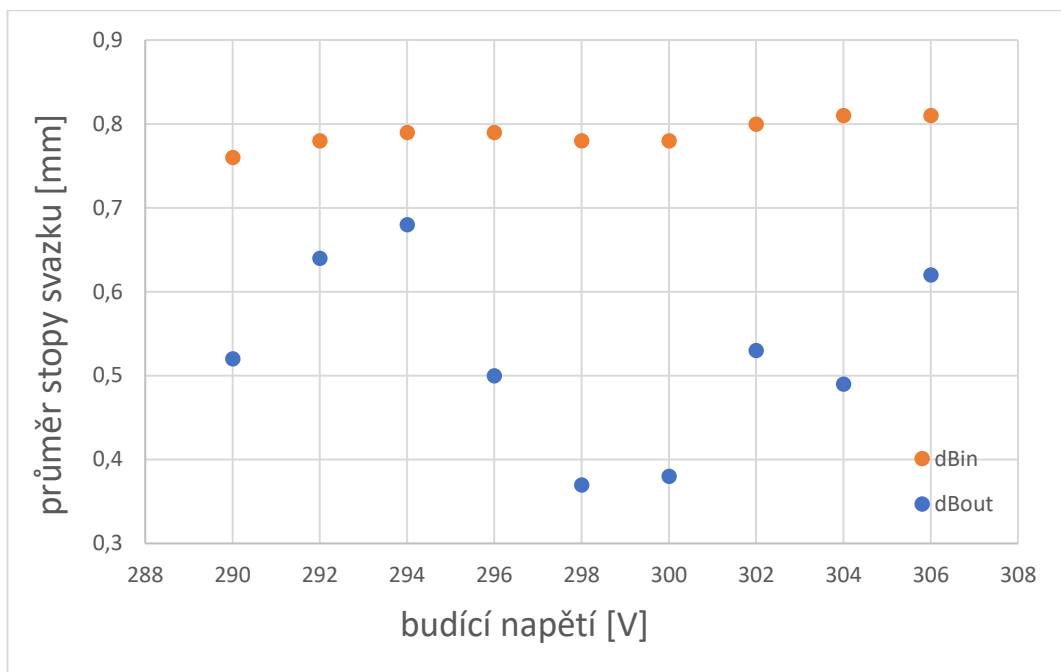
Pro analýzu povrchů svarů byl využit světelný mikroskop MB MIKR 300, který byl zároveň vybaven funkcí měření průměru stopy laserového svazku na povrchu materiálu, a kontaktní profilometr Form Talysurf Serie 2, který byl použit pro změření drsnosti povrchu svaru.

Na obrázku 34 jsou zobrazeny fotografie vstupních a výstupních stran svarů A3 a A4. Laserový svazek KLS 246 odpovídá módu svazku  $\text{TEM}_{02}$ , proto je stopa na povrchu materiálu téměř kruhově symetrická. V případě svaru A3 došlo k malému natavení výstupní strany svaru. Plocha kolem spáry mezi svařenci byla převážně tepelně ovlivněna. S nárůstem plošné hustoty výkonu taktéž rostla penetrační hloubka svaru. První náznak většího přetavení na výstupní straně svaru bylo dosaženo až při navýšení plošné hustoty pomocí napětí přibližně 1,5krát oproti hodnotě svaru A3.



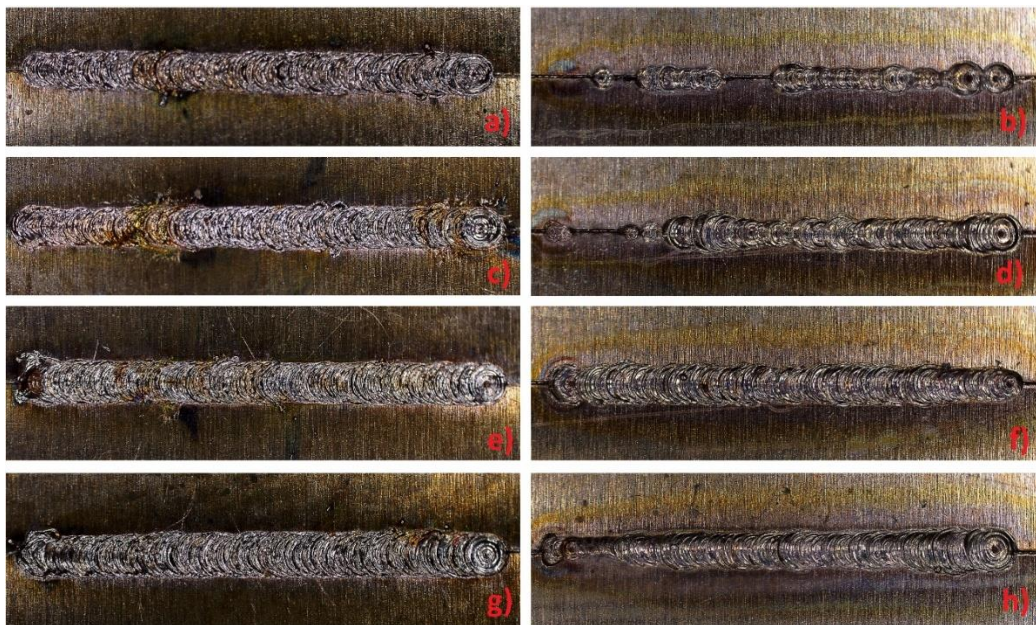
Obrázek 34: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru A3, vstupní c) a výstupní d) strana svaru A4.

Pro svary série B byl změřen průměr stopy svazku na vstupní a výstupní straně svaru a vyneseno graf závislosti naměřených průměrů stop na budícím napětí (obrázek 35). Jak se očekávalo, s narůstajícím napětím se průměr stopy na vstupní straně svaru zvětšoval, i když jenom mírně. Průměr natavené části na výstupní straně svaru se zvětšoval s rostoucím napětím do hodnoty napětí  $U = 294$  V. Následně došlo k rychlému poklesu průměru stopy svazku na výstupní straně svaru přibližně do hodnoty napětí  $U = 298$  V. Po překročení této meze průměr svazku na výstupní straně se opět zvětšoval. Vysvětlením může být, že z počátku svařování při nižších napětích převažovalo kondukční svařování a s navyšováním budícího napětí došlo k vytvoření plazmatu, které umožnilo vytvořit kapiláru ve svarové lázni.



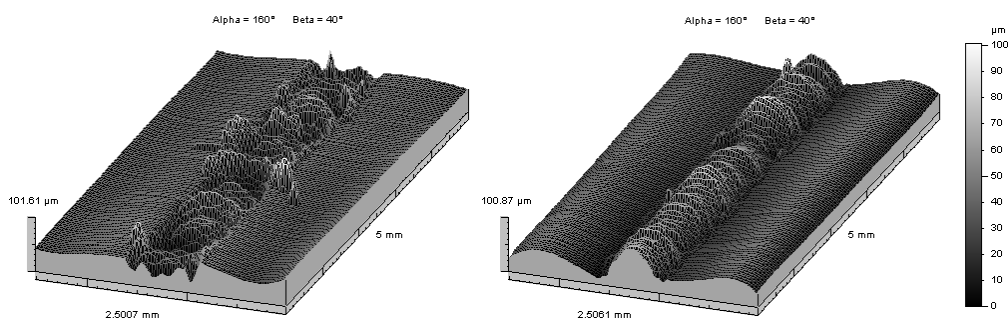
Obrázek 35: Graf závislosti průměru stopy svazku na budícím napětí pro sérii svarů B.

Ukázka svarů ze série B je na obrázku 36. Na vstupní straně svarů je viditelný rozstřík materiálu a jeho oxidace. První svary B1 a B2 vykazují částečné natavení na výstupní straně svaru. S navyšováním napětí se tato natavená část prodloužila o celou délku svaru, jak je vidět fotografii svaru B3 a B9.



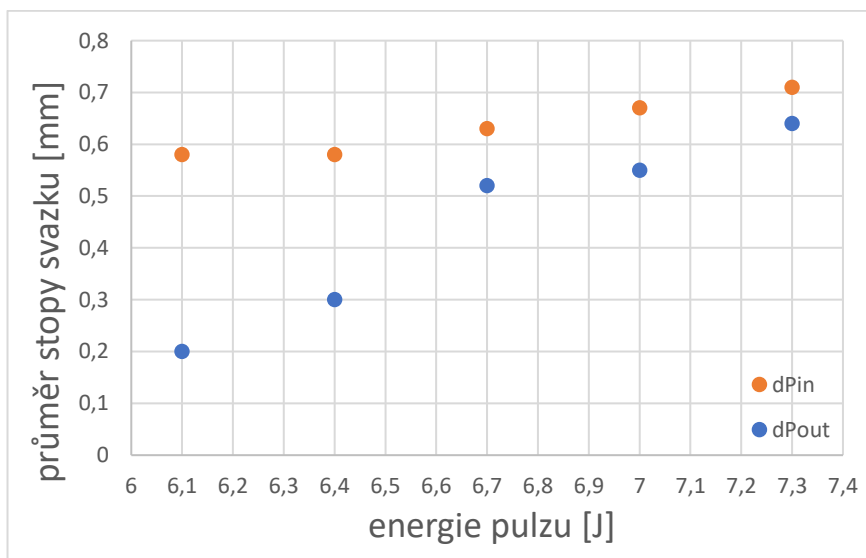
Obrázek 36: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru B1, vstupní c) a výstupní d) strana svaru B2, vstupní e) a výstupní f) strana svaru B3, vstupní g) a výstupní h) strana svaru B9.

Profil svarů byl prozkoumán profilometrem Talysurf a vytvořena 3D profil svaru. Ze série svarů B byl vybrán svar B3 jako vzorek pro Talysurf (obrázek 37). Jelikož při svařování nebyl použit ochranný plyn, došlo ke vzniku velkého množství plazmatu, které vytvořilo náhodné prohlubně a nerovnoměrnosti na vstupní straně svaru. Výstupní strana svaru se zdá symetrická bez deformací. Maximální převýšení vstupní a výstupní strany svaru bylo 100  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 37: 3D profil stopy na vstupní (vlevo) a výstupní (vpravo) straně svaru B3.

V sérii experimentů P byl opět změřen průměr stopy svazku na vstupní a výstupní straně svaru (obrázek 38). Průměr stopy svazku na vstupní i výstupní straně svaru se zvětšoval s rostoucí hodnotou energie pulzu. Průměr stopy svazku na vstupní straně svaru výrazně vzrostl po překročení energie 6,4 J. Průměr stopy se na výstupní straně průběžně zvětšoval s rostoucí energií pulzu.



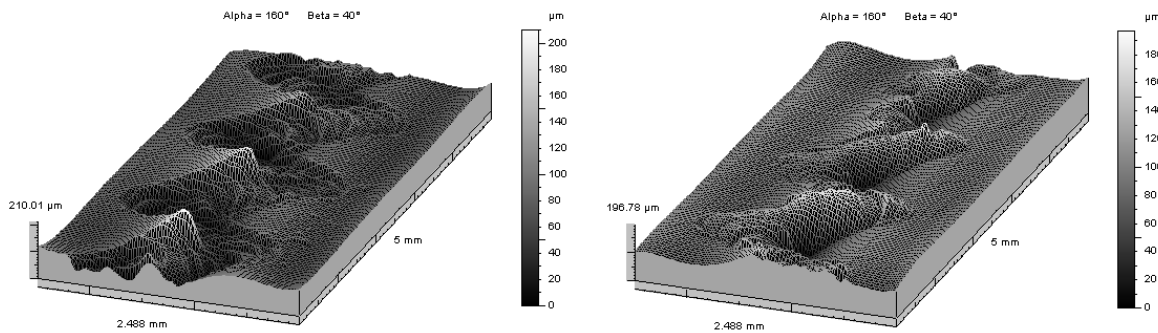
Obrázek 38: Graf závislosti průměru stopy svazku na energii pulzu pro sérii svarů P.

Fotografie na obrázku 39 uvádí ukázky svarů ze série P, a to přesněji svary P1, P2 a P5. Vstupní strana svaru P1 má větší tepelně ovlivněné okolí a stopy pulzu jsou deformovány. Se snižováním energie se tepelně ovlivněná oblast kolem svaru výrazně snižuje a deformace stop jsou menší. U svaru P1 byla vytvořena natavená část po celé délce svaru vyjma začátku. Vzhled vstupní strany svaru P4 je velmi dobrý, protože při použité energii 7 J nebyl laserový svazek schopen natavit větší plochu na výstupní straně svaru, ale natavená část byla omezena pouze na spáru mezi obrobky. Zbytek plochy, po které se laserový svazek pohyboval, byl pouze tepelně ovlivněn. Může být tedy předpokládáno, že svar P4 měl nižší pevnostní vlastnosti.



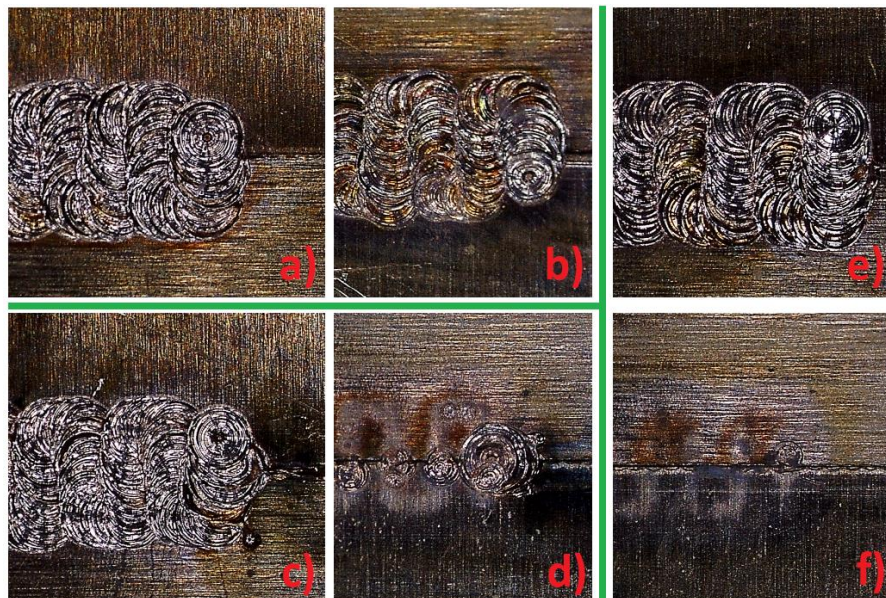
Obrázek 39: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru P1, vstupní c) a výstupní d) strana svaru P2, vstupní e) a výstupní f) strana svaru P4.

Vzorek P2 byl podroben analýze povrchu na kontaktním profilometru Talysurf (obrázek 40). Vstupní a výstupní strana kopíruje geometrii oscilace svazku pilovitěho tvaru bez větších deformací ve svaru či jeho okolí. Vstupní strana vykazuje na její levé části pravidelné vytvoření výstupků, kdežto na opačné straně jsou zarovnány. Tyto deformace mohly být způsobeny nakloněním laserové hlavy. Převýšení vstupní strany je 200  $\mu\text{m}$  a výstupní strany 180  $\mu\text{m}$ .



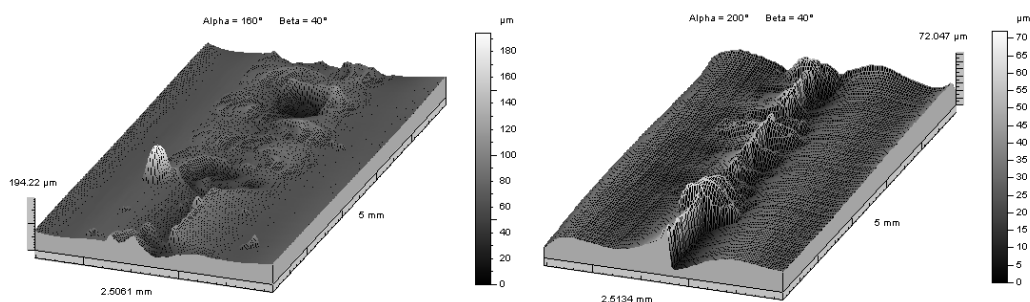
Obrázek 40: 3D profil stopy na vstupní (vlevo) a výstupní (vpravo) straně svaru P2.

Na obrázku 41 jsou zobrazeny fotografie svarů ze série O. Na vstupní straně svaru O1 nejsou viditelné známky deformací či rozstříků. Stopy pulzů se zdají být rozměrově stálé. Natavená část na výstupní straně svaru O1 zaujímá všechnu plochu, přes kterou se laserový svazek pohyboval. Při malém poklesu energie u svaru O2 nedošlo téměř k žádnému natavení na výstupní straně. Svar O2 taktéž vykazuje deformace a rozšiřování stopy pulzů v místech, kde došlo k provaření materiálu. U výstupní strany svaru O4 bylo dosaženo pouze mírného tepelného ovlivnění. Je možno uvažovat, že obdélníkové svařování při 80% překrytí pulzů je citlivé na změnu energie a při nižší hustotě výkonu velmi rychle dochází ke kondukčnímu svařování, se kterým nebylo možné materiál provařit.



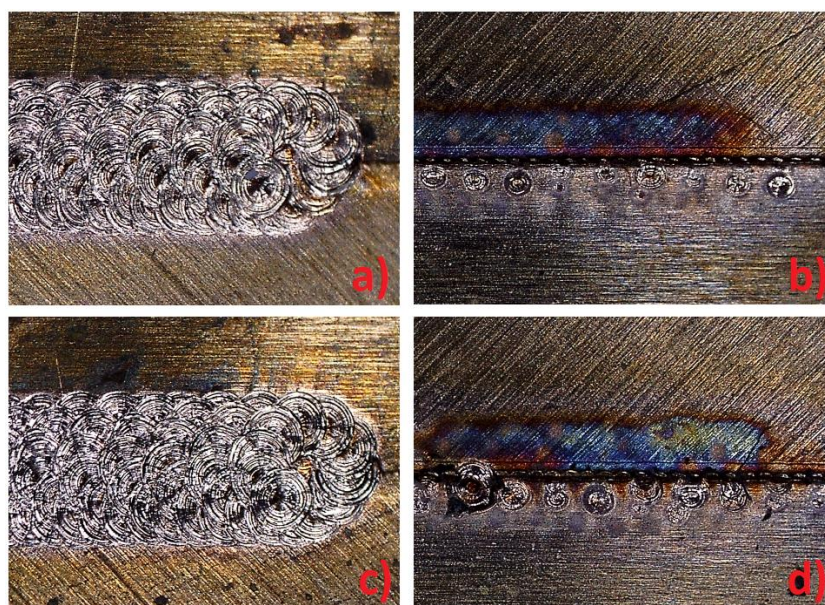
Obrázek 41: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru O1, vstupní c) a výstupní d) strana svaru O2, vstupní e) a výstupní f) strana svaru O4.

Na obrázku 42 je zobrazen profil vstupní a výstupní strany svaru O2. Na vstupní straně svaru lze vidět několik vytvořených prohlubní, ve kterých se laserový svazek odrážel a tím se vytvářela kapilára. Energie pulzu byla ovšem nedostatečná a ke vzniku kapiláry nedošlo. I když na světelném mikroskopu nebylo možné přesně určit, jestli došlo ke vzniku svaru ve spáře mezi obrobky, tak na 3D zobrazení povrchu kontaktním profilometrem Talysurf je viditelné, že ještě u svaru O2 došlo k provaření. Převýšení na vstupní straně svaru je 190  $\mu\text{m}$  a na výstupní straně svaru 70  $\mu\text{m}$ .



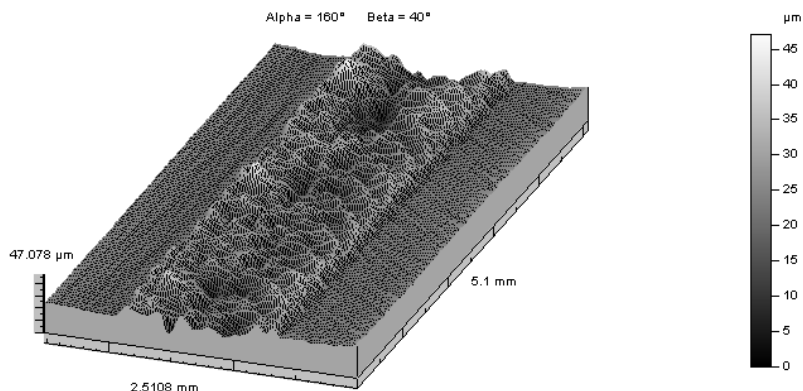
Obrázek 42: 3D profil stopy na vstupní (vlevo) a výstupní (vpravo) straně svaru O2.

Na obrázku 43 je ukázka svarů ze série S, a to svary S1 a S2. Vstupní strana svarů S1 a S2 nevykazuje velké tepelné ovlivnění okolí, oxidace je minimální. Na výstupní straně se ukázaly náznaky natavení a tepelného ovlivnění. Pro svary S3–S5 bylo tepelné ovlivnění na menší oblasti výstupní strany svaru. Může se předpokládat, že u svarů převažovalo kontaktní svařování, které je nedostatečné na penetraci materiálem.



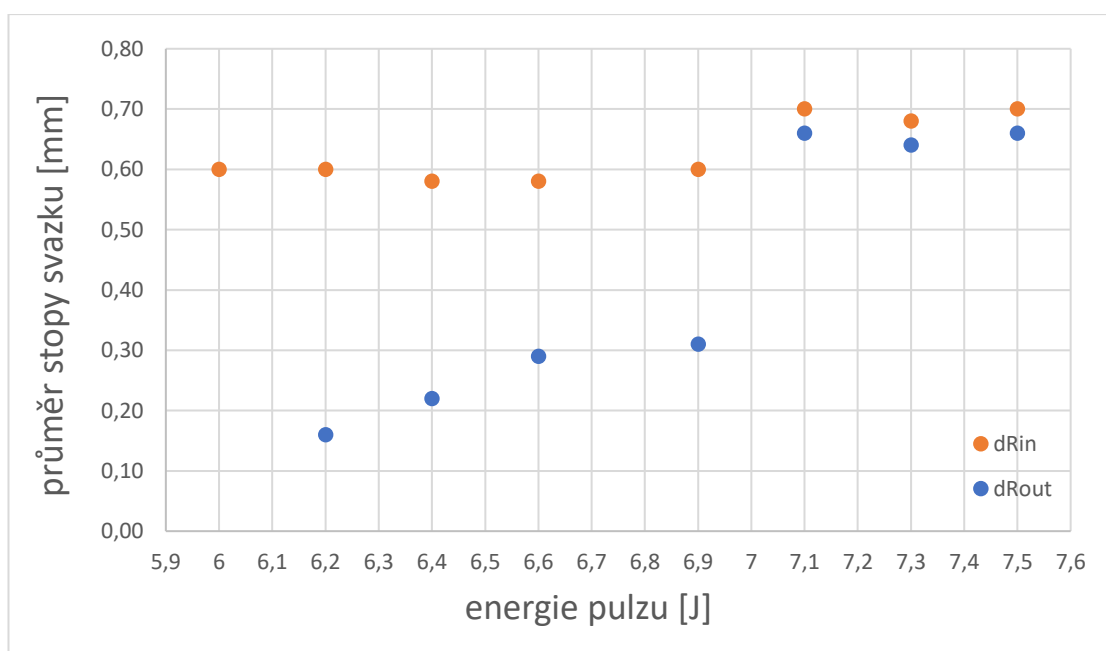
Obrázek 43: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru S1, vstupní c) a výstupní d) strana svaru S2.

U profilu stopy svaru P4 na vstupní straně (obrázek 44) lze pozorovat vytlačení nataveného kovu od středu svaru na jeho strany. Převýšení pro svar je 45



Obrázek 44: 3D profil stopy na vstupní straně svaru P4.

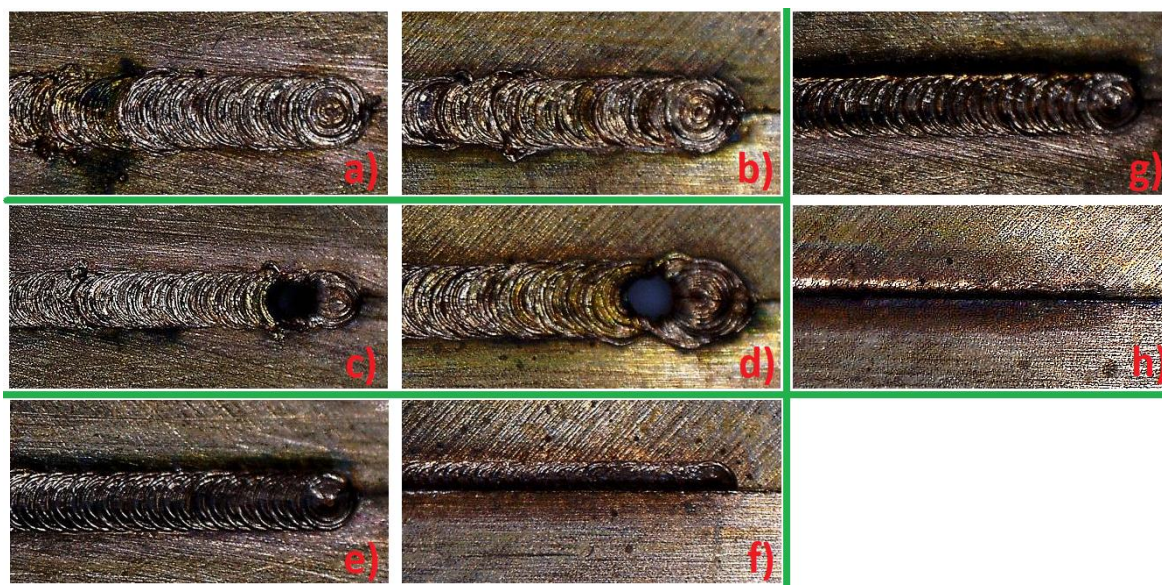
Následuje popis svarů série P. Byl vytvořen graf závislosti průměru stopy na energii pulzu (obrázek 45). V grafu lze pozorovat značná změna průměru stopy svazku na vstupní i výstupní straně svaru mezi energiemi 6,9 J a 7,1 J.



Obrázek 45: Graf závislosti průměru stopy svazku na energii pulzu pro sérii svarů R.



Fotografie na obrázku 46 zachycuje vstupní a výstupní strany svarů R1, R2, R4 a R8. V případě svarů R1 a R2 lze pozorovat vytvořené deformace stop pulzů, který byly pravděpodobně způsobeny vysokou energií a úpravou povrchu. Vytvořený svar byl natolik nestabilní, že v případě svaru R2 byl vytvořen i propal skrz materiál. Při postupném snižování energie došlo k vytvoření stabilního svaru, který nevykazuje deformace stop pulzů. U svarů R4 až R8 došlo k prudkému zmenšení průměru stopy na vstupní a výstupní straně svaru. Na výstupní straně svaru R8 byla natavená část vytvořena pouze ve velmi malém okolí spáry mezi svařenci.



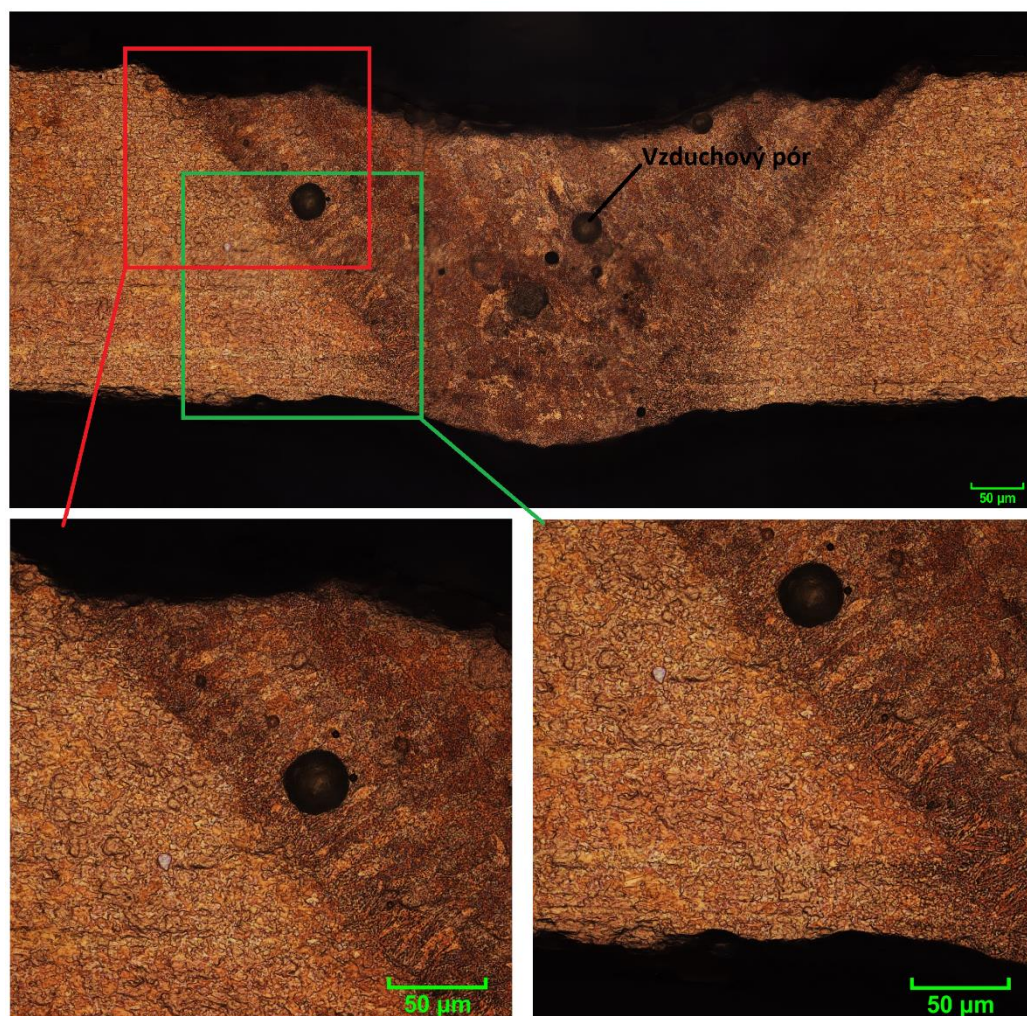
Obrázek 46: Stopa svazku na povrchu materiálu: vstupní a) a výstupní b) strana svaru R1, vstupní c) a výstupní d) strana svaru R2, vstupní e) a výstupní f) strana svaru R4, vstupní g) a výstupní h) strana svaru R8

### 4.3 Analýza metalografických vzorků

Poté, co byly svary prohlédnuty pod světelným mikroskopem, následovala příprava metalurgických vzorků z příčných řezů vybraných svarů, které byly prozkoumány pod konfokálním mikroskopem LEXT OLS 5000. Vybranými vzorky ze sérií experimentů byly svary B1, B9, P1 a O1. Následující kapitola obsahuje obrázky těchto vzorků s popisem mikrostruktur, které se vytvořily ve svarech a na jejich rozhraních.

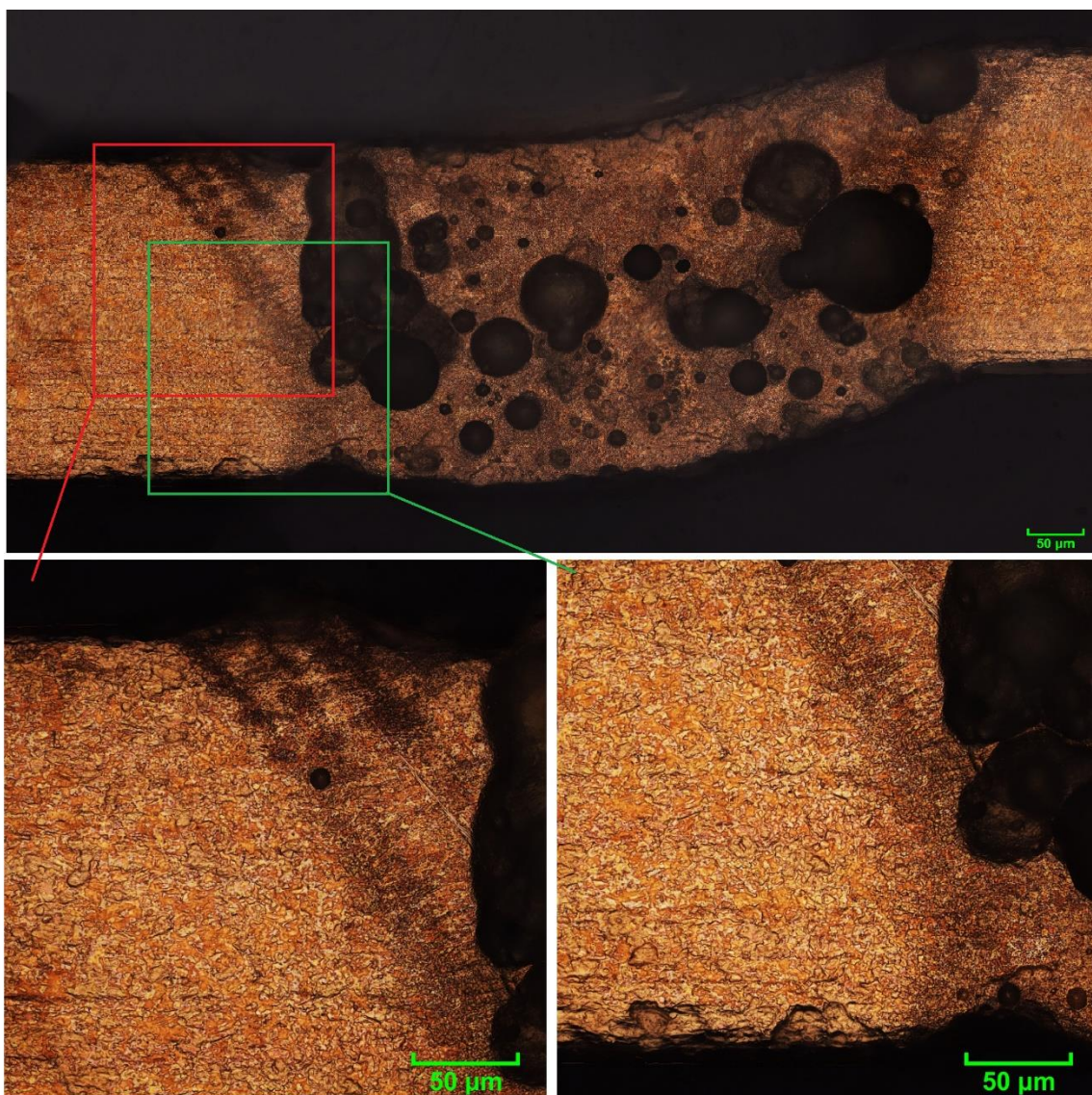
Obrázek 47 zobrazuje fotografie mikrostruktury svaru B1, pro který byla použita nejnižší hodnota energie pulzu pro svary série B. Svar vykazuje konkávní tvar, mírné propadnutí hlavy svaru s výskytem vzduchových pórů, které byly pravděpodobně vytvořeny

vypařenou částí materiálu. Vytvořená struktura svaru na jeho rozhraní se základním materiálem odpovídá kolumnárním krystalům, které jsou orientovány proti směru odvodu tepla, tedy kolmo na rozhraní svaru. Ve střední části lze pozorovat hrubší strukturu zrn způsobenou překrytím laserových stop a opětovnému zahřátí svarového kovu.



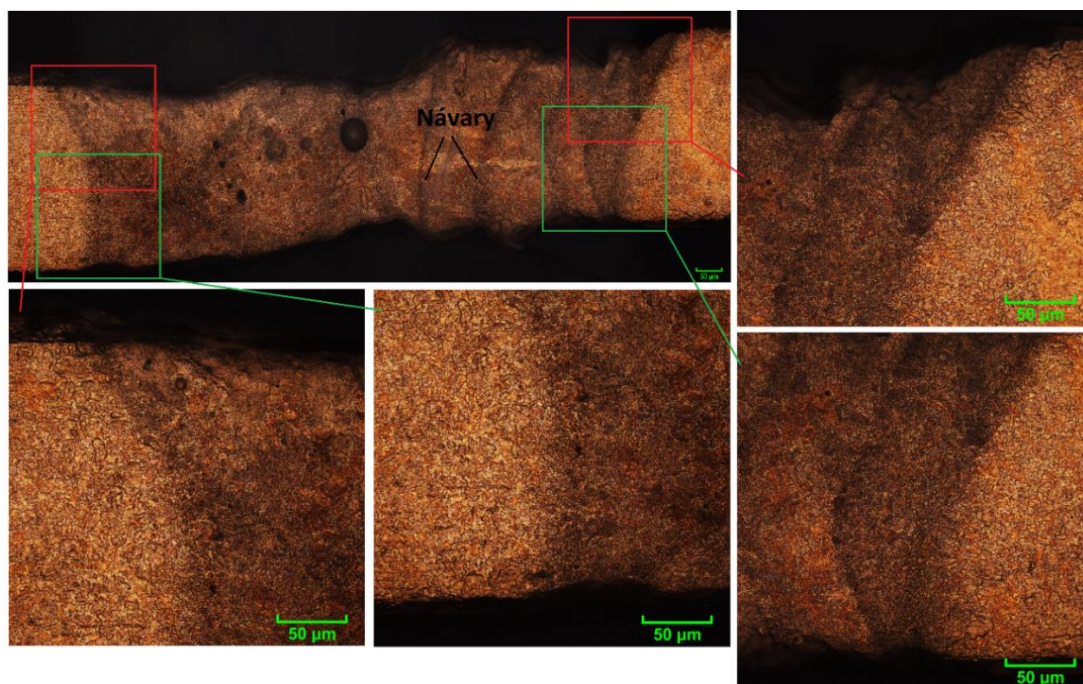
Obrázek 47: Fotografie mikrostruktury příčného řezu svarem B1.

Na obrázku 48 jsou uvedeny fotografie mikrostruktury svaru B9. Svar B9 byl vytvořen s nejvyšší použitou hodnotou budícího napětí v sérii svarů B. Ve fotografiích ze světelného mikroskopu tento svar nevykazoval deformace na jeho vstupní a výstupní straně (obrázek 36). Při analýze příčného řezu pod konfokálním mikroskopem LEXT se objevilo velké množství pórů, které jsou způsobené vysokým budícím napětím, resp. vysokou plošnou hustotou výkonu. Na rozhraní se opět vyskytují dendritické útvary struktury, která je zároveň velmi jemná.



Obrázek 48: Fotografie mikrostruktury příčného řezu svarem B9.

Fotografie na obrázku 49 zobrazuje příčný řez svarem S1. Svar nabývá tvaru, který odpovídá indukčnímu svařování. Ve svaru se vytvořilo jen malé množství pórů. Pilovitým pohybem se v řezu svaru objevily půlkruhovitě návaly taveniny. Rozhraní svaru s materiálem tvoří malá zrna.



Obrázek 49: Fotografie mikrostruktury příčného řezu svarem S1.

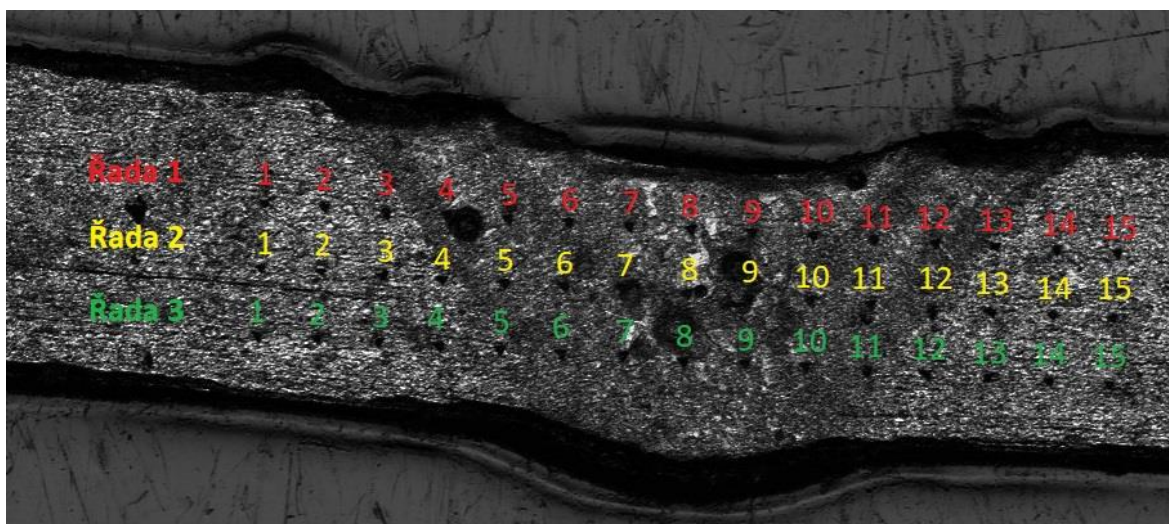
Fotografie mikrostruktury svaru O1 jsou ukázány na obrázky 50. Vrchní strana svaru je tvořena periodickým výskytem prohlubní. V řezu se taktěž objevují póry. Struktura svaru na rozhraní je tvořena výraznou dendritickou strukturou, která je orientována kolmo na rozhraní. Obdélníkový pohyb způsobil opakující se změny struktury. Byly vytvořeny přechody mezi velmi jemnou strukturou s malými zrny a strukturou tvořenou většími zrny.



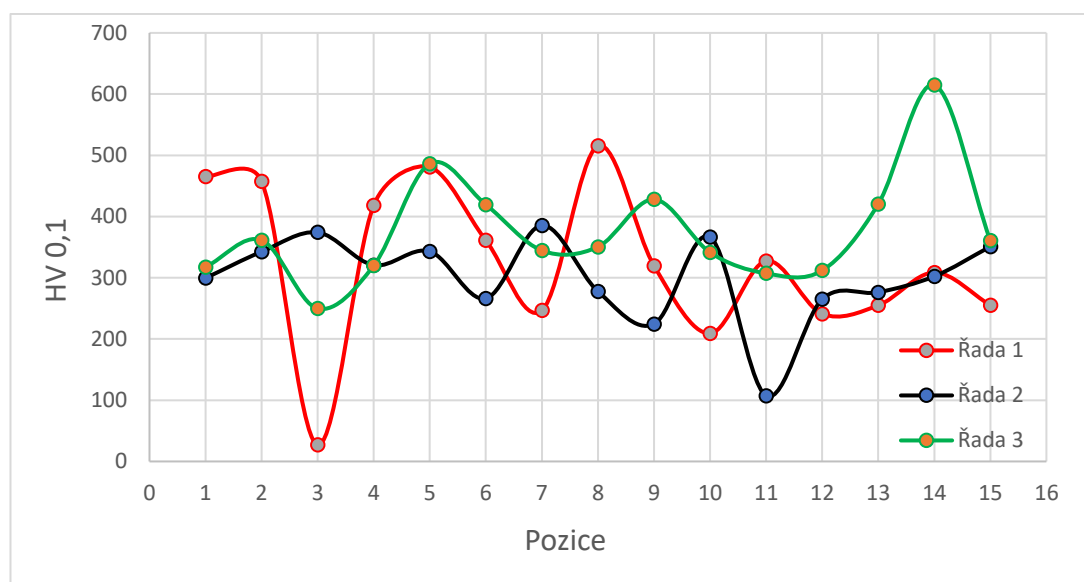
Obrázek 50: Fotografie mikrostruktury příčného řezu svarem O1.

#### 4.4 Zkouška tvrdosti

Byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse na průřezu svarem B1. Ve třech rovnoběžných řadách bylo vytvořeno 15 vpichů (obrázek 51). Vzdálenost vpichů byla 0,06 mm. Na obrázku 52 jsou v grafu vyobrazeny hodnoty tvrdosti pro vpichy řad 1, 2 a 3. Tvrdost svaru se pohybovala od 107 HV 0,1 do 515 HV 0,1. Tvrdost základního materiálu a převařené části materiálu se ukázala být velmi podobná až na určité odchylky.



Obrázek 51: Polohy měření mikrotvrdosti na průřezu svarem B1.



Obrázek 52: Graf mikrotvrdosti pro svar B1.

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o problematice svařování mědi konvenčními metodami a moderními laserovými systémy. Uvádí použití moderních metod pro svařování materiálů, které mají vysokou odrazivost pro laserové záření. Pro ukázkou těchto metod byla zvolena oscilace laserového svazku v různých provedeních a změna drsnosti povrchu svažovaného materiálu. Jako svařovaný materiál byla zvolena slitina mědi a cínu CuSn8. Svařování probíhalo s pulzním laserem Nd:YAG KLS 246 - 102, který generuje záření o vlnové délce 1 064 nm.

V první části experimentu je ukázkou běžných lineárních svarů. S rostoucím napětím se průměr stopy svazku na vstupní straně pouze mírně navyšoval, ale na výstupní straně byl nárůst výraznější. Byla zachycena změna z kondukčního svařování na vytvoření kapiláry, která se projevila změnou velikosti natavené části na povrchu. Při analýze svarů pod konfokálním mikroskopem LEXT bylo zjištěno, že i když svary ze vstupní a výstupní strany nebyly viditelně deformované, tak při zobrazení jejich mikrostruktury v řezu svarem byly nalezeny oblasti s vytvořenými vzduchovými póry, jejichž velikost a množství se zvětšovalo s růstem energie pulzu. Analýza profilu svaru a její rekonstrukce ve 3D obrazu nám ukázala nevýhodu svařování laserem bez použití ochranného plynu. Na vstupní straně svaru byly zachyceny deformace, které odpovídají tvorbě velkého množství plazmatu. Zkouškou tvrdosti podle Vickerse se neprokázal rozdíl mezi tvrdostí základního materiálu a materiálu převařeného.

Metodou oscilací laserového svazku bylo dosaženo nejlepších výsledků pro pilovitý tvar, následoval obdélníkový a spirálový tvar. U pilovitého tvaru byl zaznamenán průvar i při nejnižších použitých energiích, kdežto obdélníkový tvar byl velmi citlivý na změnu energie a při jejím malém poklesu bylo dosaženo kondukčního svařování s malou hloubkou penetrace. Pro spirálový tvar bylo dosaženo pouze minimálního vytvoření natavené části povrchu na výstupní straně svaru. Oproti lineárnímu pohybu byla teplota rozložena a nedošlo k vytvoření velkého množství plazmatu nad povrchem, tedy nebyly vytvořeny deformace na vstupních stranách svarů pro všechny oscilační metody. To lze také pozorovat na příčných řezech, kde nedošlo k vytvoření většího množství vzduchových pórů.

Lineární svary byly vytvořeny na povrchu, který byl narušen brusným papírem. Jako v konkávním otvoru kapiláry se očekává, že laserový svazek bude odražen na těchto vytvořených stěnách a tím bude navýšena absorpce s následnou penetrací. V průběhu našeho experimentu se ukázalo, že při vyšších energiích došlo k vytvoření nestabilního svaru, který

vykazoval deformace a v některých případech i průvary. U nižších energií pulzů se svar stabilizoval. Výsledky jsou porovnatelné s metodou oscilace svazku pilovitého tvaru.

Porovnání lineární pohybu s metodou oscilací svazku byly vytvořeny rozdíly, které silně souvisí s tepelným rozložením na svařovaném materiálu. Jelikož laserový systém KLS 246 - 102 není vybaven rozmítací laserovou hlavou, oscilace laserové svazku byly provedeny krátkými pojezdy stolu s obrobkem, proto nebylo možné dosáhnout takových výsledků jako s rozmítací hlavou. Simulace svařování s různými typy oscilace přesto bylo splněno a svařování se změnou drsnosti povrchu ukázalo výrazně odlišné výsledky při použití vyšších energií pulzu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] OATES, William. *Welding Handbook: Materials and applications - part 1*. 8<sup>th</sup> ed, Volume 3. American Welding Society, ©1996. ISBN 0871714701.
- [2] KEARNS, W. H. *Welding Handbook: Metals and Their Weldability*. 7<sup>th</sup> ed, Volume 4. U. K.: Macmillan Publishers, 1983. ISBN 978-1-349-05563-0.
- [3] MRŇA, Libor. *Difuzní svařování*. Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_difuzni\\_svarovani\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_difuzni_svarovani_mrna.pdf)
- [4] KREANS, W. H. *Welding Handbook: Welding Processes- Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering*. 7<sup>th</sup> ed, Volume 2. U. K.: Macmillan Publishers, 1978. ISBN 978-1-349-04293-7.
- [5] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [6] JEFFUS, Jerry. *Welding Principles and Applications*. 8<sup>th</sup> ed. Boston: Cengage Learning, ©2017. ISBN 978-1-3054-9469-5.
- [7] DAVIS, J. R. *Copper and copper alloys*. Materials Park, OH: ASM International, c2001. ISBN 0871707268.
- [8] KÜHNE, Theresa, Evelyn HOFMANN a Uwe FÜSSEL. *Soldering and brazing of copper and copper alloys* [online]. Düsseldorf: Copper Alliance [cit. 2019-04-11]. Dostupné z:  
[https://www.copper.org/applications/marine/cuni/pdf/Broschuere\\_Loeten\\_ENG.pdf](https://www.copper.org/applications/marine/cuni/pdf/Broschuere_Loeten_ENG.pdf)
- [9] KUBÍČEK, J. *Technologie svařování* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv\\_technologie\\_vyroby\\_I\\_svarovani\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf)
- [10] *Arc Welding of Nonferrous Metals* [online]. Japan, Tokyo: Kobe Steel, ©2015 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z:  
[http://www.kobelco.co.jp/english/welding/events/files/2015\\_KOBELCO\\_Nonferrous.pdf](http://www.kobelco.co.jp/english/welding/events/files/2015_KOBELCO_Nonferrous.pdf)
- [11] *Základní metody svařování. Svářečky-Elektrody* [online]. Příbram: QUICK - SERVIS, spol. s r.o. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/zakladni-metody-svarovani/t-87>
- [12] PHILLIPS, David. *Welding Engineering: An Introduction*. 1th ed. John Wiley, ©2016. ISBN 9781118766446.



- [13] Miller's Accu-Pulse™ Pulsed MIG Technology Tackles Exotic Metals, Provide 15 to 20 Percent Improvement, 1 Year Payback. *Miller - Welding Equipment* [online]. Appleton: Miller Electric Mfg. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/millers-accupulse-pulsed-mig-technology-tackles-exotic-metals-provide-15-to-20-percent-improvement-1-year-payback>
- [14] BRUNCO, Ross. WELDING COPPER IS POSSIBLE... & IT MAKES GREAT INTERIOR FRAMING. *Dahlstrom Roll Form* [online]. Jamestown: Dahlstrom, 2018 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://blog.dahlstromrollform.com/welding-copper-interior-framing>
- [15] Plasma-welding 0,55mm Copper. *Youtube* [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=c50XVMyyU>. Kanál uživatele: Jo- Si
- [16] Punktschweißen. *Harms Wende* [online]. Hamburg: Harms & Wende GmbH & Co. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.harms-wende.de/wissen/widerstandsschweissen/punktschweissen/>
- [17] LASOVSKÝ, Jiří. *Bodové odporové svařování měděných drátů* [online]. 2015 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109776/LAS0029\\_FS\\_B2341\\_2303R002\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=n](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109776/LAS0029_FS_B2341_2303R002_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=n). Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní. Vedoucí práce Vladislav Ochodek.
- [18] Friction Stir Welding Copper. *Youtube* [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JehRZztARfU> Kanál uživatele: Bill Johnson
- [19] YILBAS, B. S. *Friction welding: thermal and metallurgical characteristics*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-3-642-54606-8.
- [20] Diffusion Bonding. *Phase Transformations and Complex Properties* [online]. University of Cambridge 27 Charles Babbage Road, Cambridge CB3 0FS, U.K. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Amir/bond.html?fbclid=IwAR2\\_n6N4UZtwP0FiljHizQJQDh26krThUfxSQsp7a02HKc9C9G4xXT6oyNI](http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Amir/bond.html?fbclid=IwAR2_n6N4UZtwP0FiljHizQJQDh26krThUfxSQsp7a02HKc9C9G4xXT6oyNI)
- [21] KREANS, W. H. *Welding Handbook: Resistance and Solid-State welding and Other Joining Processes*. 7th ed, Volume 3. UK: Macmillan Publishers, ©1980. ISBN 9781349049639.
- [22] Diffusion Bonding. *Refrac Systems: Diffusion Bonding and Vacuum Hot Pressing* [online]. Arizona: Refrac Systems [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.refrac.com/services/diffusionBonding.html>

- [23] GIETZELT, Thomas, Volker TOTH a Andreas HUELL. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure. In: *Joining Technologies* [online]. InTech, 2016, 2016-09-21 [cit. 2019-05-28]. DOI: 10.5772/64312. ISBN 978-953-51-2596-9. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/joining-technologies/diffusion-bonding-influence-of-process-parameters-and-material-microstructure>
- [24] *Periodicals of Engineering and Natural Sciences: Ultrasonic welding of dissimilar materials: A review* [online]. (Vol. 3 No. 1 (2015) [cit. 2019-04-24]. ISSN 2303-4521. Dostupné z: [http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/index?fbclid=IwAR178VLzFKs9X23aJg9YR4Yt99XDQRsrI5iva9xEG\\_RmupqtBLqrbS3-MTc](http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/index?fbclid=IwAR178VLzFKs9X23aJg9YR4Yt99XDQRsrI5iva9xEG_RmupqtBLqrbS3-MTc)
- [25] GRAFF, Karl a Matt BLOSS. Understanding ultrasonic welding. *Thefabricator* [online]. Elgin,[cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/understanding-ultrasonic-welding?fbclid=IwAR3A3GtyWZVhU1luBnJtoRCaPF6j5uSYFUWj0jT-MXIAJc3mtuP3ViVJi8k>
- [26] RAYNOCH, Jindřich. *Svařování* [online]. 2012 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/SVAŘOVÁNÍ-UT.pdf>. Střední průmyslová škola Ostrava – Vítkovice, příspěvková organizace.
- [27] Svařování svazků vodičů. *Wiretech* [online]. Brno: WIRETECH [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-kovu/svarovani-svazku-vodicu>
- [28] BROWN, Lou. *Cost-Effective Manufacturing: Joining of Copper and Copper Alloys* [online]. CDA Publication No 98, ©1994 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://copperalliance.org.uk/resources/pub-098-joining-copper-copper-alloys/?download=start>.
- [29] KATAYAMA, Seiji, ed. *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 9780857092649.
- [30] *Laser2000: Láser alta potencia n° producto: NUB-AOI50* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.laser2000.es/Fuentes-y-Sistemas-Laser/Laser-fuentes-de-luz/Laseres-de-estado-solido/Laser-azul-alta-potencia.html>
- [31] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). *LAO: Laser a Optika* [online]. Praha: LAO, 2011 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>

- [32] BIRO, E., D. C. WECKMAN a Y. ZHOU. Pulsed Nd: YAG laser welding of copper using oxygenated assist gases. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2002, **33**(7), s. 2019-2030 [cit. 2019-05-29]. DOI: 10.1007/s11661-002-0034-4. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-002-0034-4>
- [33] SHANNON, Geoff. Choosing between Nd:YAG or fiber lasers for micro welding. *Industrial laser solutions for manufacturing* [online]. Endeavor Business Media, 2016 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16486524/choosing-between-ndyag-or-fiber-lasers-for-micro-welding>
- [34] TruDisk with green wavelength. *TRUMPF* [online]. New Mexico: TRUMPF [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/en\\_US/products/lasers/disk-lasers/trudisk-with-green-wavelength/](https://www.trumpf.com/en_US/products/lasers/disk-lasers/trudisk-with-green-wavelength/)
- [35] Green light for welding copper. *TRUMPF* [online]. New Mexico: TRUMPF, 2017 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/en\\_US/magazine/green-light-for-welding-copper/](https://www.trumpf.com/en_US/magazine/green-light-for-welding-copper/)
- [36] LAWRENCE, J. *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. Second edition. Cambridge, MA, United States: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, [2018]. ISBN 978-008-1012-536.
- [37] Fiber laser welding enables new capabilities and flexibility. *Industrial laser solutions for manufacturing* [online]. Endeavor Business Media, 2014 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16484882/fiber-laser-welding-enables-new-capabilities-and-flexibility>
- [38] Fiber Laser Welding: High beam quality and efficient welding of a wide variety of materials. *Amada: Amada Miyachi America* [online]. Monrovia: Amada, 2015 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: [http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducation%2Falresources\\_articles&file=0153400000255Fg](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducation%2Falresources_articles&file=0153400000255Fg)
- [39] PELAPRAT, Jean-Michel, Matthew FINU, Robert FRITZ a Mark ZEDIKER. *The Laser User: Game-changing blue laser sources: Shorten wavelengths and improved applications*. 18-19. Dostupné z: <https://www.laser2000.co.uk/getattachment/Company/Latest/Game-changing-blue-laser-sources-shorter-waveleng/AILU-The-Laser-User-Issue-91-Blue-Laser-nuburu-article-only.pdf?lang=en-GB>
- [40] *Laserline LDMblue: Blue High Power Diode Laser* [online]. 2019, 1-6 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: [https://www.laserline.com/fileadmin/Dokumente/Broschueren\\_EN/Laserline-LDMblue-product-brochure.pdf](https://www.laserline.com/fileadmin/Dokumente/Broschueren_EN/Laserline-LDMblue-product-brochure.pdf)

- [41] NUBURU offers the industry's only high power blue laser, the AO product line. *Nuburu* [online]. Nuburu [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.nuburu.net/products/>
- [42] PELAPRAT, Jean-Michel, Matthew FINUF, Robert FRITZ a Mark ZEDIKER. Novel Lasers: Blue direct-diode lasers extend industrial laser capability. *LaserFocusWorld* [online]. 2018 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16555269/novel-lasers-blue-directdiode-lasers-extend-industrial-laser-capability>
- [43] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit. 2019-06-04]. ISBN 978-80-244-3076-8. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Chmelickova-Inovace\\_laserovych\\_tehnologii.pdf](https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Chmelickova-Inovace_laserovych_tehnologii.pdf)
- [44] High-power blue laser improves fabrication throughput. *Industrial laser solutions for manufacturing* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-33/issue-1/features/high-power-blue-laser-improves-fabrication-throughput.html>
- [45] KAISER, E., E. M. DOLD, A. KILLI, S. ZASKE a S. PRICKING. *Application benefits of welding copper with a 1 kW, 515 nm continuous wave laser* [online]. In: . Bayerisches Laserzentrum, 2018 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.lane-conference.org/industrial-contributions-2018/>
- [46] MRŇA, Libor a Petr HORNÍK. Pokročilé metody laserového svařování. *MM spektrum* [online]. c2019, 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani.html>
- [47] SANSON, Bryce, Tony HOULT a Mustafa COSKUN. Fiber laser welding technique joins challenging metals. *Industrial laser solutions for manufacturing* [online]. ©2019, 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485057/fiber-laser-welding-technique-joins-challenging-metals>
- [48] FRANCO, Diana Ferreira. *Wobbling laser beam welding of copper*. Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa, 2017. Disertační práce pro magisterské studium. Dostupné z: <https://run.unl.pt/handle/10362/27684>
- [49] MAINA, Martin, OKAMOTO, Reiki INOUE, NAKASHIBA, Akira OKADA a Tomokazu. Influence of Surface State in Micro-Welding of Copper by Nd. In: *Applied Sciences* [online]. 2018, **8**(12) [cit. 2019-05-29]. DOI: 10.3390/app8122364. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2364>
- [50] CuSn8 - UNS.C52100 Phosphor Bronze Alloys. *ALB Copper Alloys* [online]. c2009 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.alb-copperalloys.com/phosphor-bronze/c52100/>

- [51] CuSn8. *Kemper: Driving progress* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.kemper-olpe.de/cz/oblasti-cinnosti/pasy/material/bronz/cusn8/>
- [52] Industrial Microscopes OLS5000. *Olympus* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols5000/#!cms\[tab\]=%2Fmetrology%2Fols5000%2Fspecifications](https://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols5000/#!cms[tab]=%2Fmetrology%2Fols5000%2Fspecifications)
- [53] *Taylor Hobson: Surface Finish Measurement Methods and Instrumentation* [online]. In: . Taylor Hobson Centre of Excellence, s. 8-9 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/teleconference%20archives/surface%20finish%20measurement%20methods%20and%20instrumentation.pdf?la=en>
- [54] *Zkoušky tvrdosti*. Dostupné také z: [https://www.opi.zcu.cz/Zkousky\\_tvrdosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf)
- [55] UČÍK, Martin. *Laserové navařování kovovým práškem*. Olomouc, 2018. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

## Seznam použitých symbolů

$BPP$	beam parametr product
$d_{atk}$	průměr krystalu aktivního prostředí
$d_{Bin}$	průměr stopy laserového svazku na vstupní straně svaru pro sérii svarů B
$d_{Bout}$	průměr stopy laserového svazku na výstupní straně svaru pro sérii svarů B
$D_{clona}$	průměr clony v laserovém rezonátoru
$d_{foc}$	průměr laserového svazku v ohniskové rovině spojné čočky
$d_{Pin}$	průměr stopy laserového svazku na vstupní straně svaru pro sérii svarů P
$d_{Pout}$	průměr stopy laserového svazku na výstupní straně svaru pro sérii svarů P
$d_{Rin}$	průměr stopy laserového svazku na vstupní straně svaru pro sérii svarů R
$d_{Rout}$	průměr stopy laserového svazku na výstupní straně svaru pro sérii svarů R
$d_z$	průměr laserového svazku ve vzdálenosti $z$ od roviny ohniska spojné čočky
$E$	energie pulzu
$f$	frekvence pulzů
$F$	přítlačná síla
$F_{foc}$	ohnisková vzdálenost spojné čočky
$HV$	označení měření tvrdosti podle Vickerse
$K$	číslo vyjadřující kvalitu laserového svazku
$L$	celková délka rezonátor
$l_{akt}$	délka krystalu aktivního prostředí
$l_{rez}$	nastavená délka rezonátoru laserového systému KLS 246 – 102
$P$	průměrný výkon
$P_p$	vrcholový výkon
$pp$	překrytí pulzů
$Q_{pp}$	plošná hustota vrcholového výkonu
$R_z$	parametr drsnosti povrchu
$t_p$	délka pulzu
$U$	budící napětí
$u$	průměrná délka úsečky
$v$	rychlost svařování
$z$	vzdálenost obrobku od ohniskové vzdálenost spojné čočky
$\lambda$	vlnová délka laserové záření