



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ OCELÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

LASER WELDING OF STEELS IN AUTOMOTIV INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Paleta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Petr Paleta
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2015/16

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

Laserové svařování ocelí v automobilovém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Automobilový průmysl klade vysoké nároky na přesnost a rychlost výrobních operací. Z toho důvodu se u některých sestav nahrazuje bodové svařování elektrickým odporem svařováním laserem na dálku. Svarové spoje jsou provedeny velmi vysokou rychlostí a nejsou chráněné ochranným plynem. V BP je proveden rozbor typů, provedení a kvality laserových svarů.

Cíle bakalářské práce:

- 1.Provést teoretický rozbor metody laserového svařování.
- 2.Popsat jednotlivé oblasti využití.
- 3.Navrhnout obecný technologický postup svařování pro zvolenou oblast aplikací.
- 4.Vyhodnotit technologické parametry a provést rozbor vzorků.
- 5.Vypracovat technologický postup WPS.

Analyzovat svařování ocelí laserem z pohledu vlivu teplotních cyklů na vlastnosti spojů. Stanovit možné strukturní změny svarů.

Seznam literatury:

- Benko,B. a kol. (2000): Laserové technologie, Technická universita, Bratislava.
- Pilous,V. (2009): Materiály a jejich chování při svařování.s.r.o. Škoda-welding, Plzeň.
- Kolektiv autorů. (2011): Materiály a jejich svařitelnost. Škola-welding,s.r.o. Plzeň..
- Kolektiv autorů. (2011): Technologie svařování a zařízení. Škola-welding, s.r.o.Plzeň

Kolektiv autorů. (2011): Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. Škola-welding,s.r.o. Plzeň

Kolektiv autorů. (2011): Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Škola-welding,s.r.o. Plzeň

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

PALETA Petr: Laserové svařování ocelí v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se začíná nahrazovat odporové bodové svařování laserovým svařováním. V bakalářské práci byl proveden rozbor laserových svařovacích metod, hlavně metoda laserového svařování na dálku, která je použita pro experiment. Dále byla popsána oblast využití laserového svařování a navrhnout obecný technologický postup svařování. V experimentální části byl proveden metalografický výbrus svařeného vzorku a byla vyhodnocena jeho makrostruktura a mikrostruktura.

Klíčová slova

Laser, svařování, svařování na dálku, svar, vzorek

ABSTRACT

PALETA Petr: Laser welding of steels in automotiv industry

In the automotive industry is beginning to replace the resistance spot welding by laser welding. The bachelor thesis was an analysis of laser welding methods, especially the method of remote welding, which is used for the experiment. Furthermore, the use of laser welding was described. We have also suggested the general technological process of welding. The experimental part was carried by metalografic cut of welded sample, which was evaluated by its macrostructure and microstructure.

Key words

Laser, welding, remote welding, weld, sample

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALETA, P. *Laserové svařování oceli v automobilovém průmyslu*. Brno, 2016. 33s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 23.5.2016

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za velkou podporu během bakalářského studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
	Str.
ÚVOD	10
1 TEORIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	11
1.1 Fyzikální podstata laseru	11
1.1.1 Optický rezonátor	12
1.2 Rozdělení laserů	13
1.2.1 Pevnolátkové lasery	14
1.2.2 Plynové lasery	14
1.2.3 Polovodičové lasery	15
1.2.4 Vláknové lasery	15
1.3 Princip laserového svařování	16
1.3.1 Kondukční režim	16
1.3.2 Penetrační režim	16
1.4 Svařovací metody	17
1.4.1 Svařování na dálku („Remote welding“)	17
1.4.2 Hybridní laser – obloukové svařování	19
2 OBLASTI VYUŽITÍ LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	21
3 OBECNÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP SVAŘOVÁNÍ	23
3.1 Přípravky a polohovadla	23
3.2 Programování svařovacího robota	24
3.3 Kontrola svaru	24
3.3.1 Vizuální metoda	24
3.3.2 Penetrační metoda	25
3.3.3 Optická metalografie	25
4 VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ	
A ROZBOR VZORKU	27
5 TECHNOLOGICKÝ POSTUP WPS	32
6 ZÁVĚRY	33
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [3], [15], [18], [23]

V roce 1960 se podařilo vytvořit první laserový efekt pomocí krystalu syntetického rubínu. Od té doby lasery prošly mnoha vylepšeními a zdokonaleními. Postupně lasery začaly pronikat do všech oblastí lidské činnosti, jako je např. medicína, výpočetní technika, elektrotechnika a samozřejmě strojírenství. Ve strojírenství se laser používá pro tepelné zpracování, dělení materiálu a také svařování. Jedna z oblastí, ve které se laser začal v posledních letech využívat, je automobilový průmysl.

V automobilovém průmyslu se klade velký důraz na rychlost výroby a vysokou kvalitu výrobků. Proto se do výrobního procesu zařazují nejmodernější technologie. Mezi tyto technologie se zařazuje i laserové svařování. Tato metoda svařování se vyznačuje vysokou kvalitou svarového spoje, vysokou svařovací rychlostí a vysokou přesností. Mezi další výhody laserového svařování patří snadná automatizace, tichý a čistý provoz oproti ostatním svařovacím metodám a možnost svařovat materiály s velmi rozdílnými teplotami tavení.

V bakalářské práci je proveden teoretický rozbor laserového svařování a popsána oblast využití. Praktická část této práce se zabývá rozбором vzorku, svařeného metodou laserového svařování na dálku. Následně je proveden rozbor makrostruktury a mikrostruktury vzorku.



Obr. 1 Laserové svařování karoserie auta [3] Obr. 2 Hybridní laser – obloukové svařování [17]



Obr. 3 Svařování na dálku [18]

1 TEORIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [23]

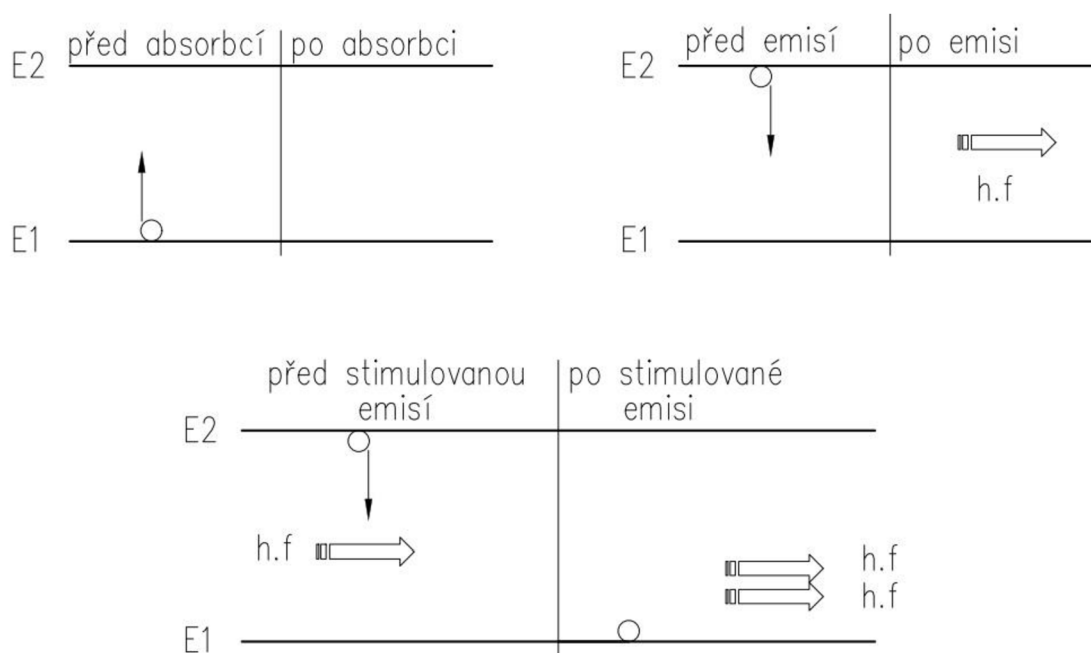
LASER je zkratka z počátečních písmen anglických slov, které popisují samotnou podstatu laseru Light of Amplification by Stimulated Emission of Radiation, český překlad znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření.

1.1 Fyzikální podstata laseru [12], [23], [28] [30]

V teorii kvantové fyziky je popsáno, že hmotné prostředí (složené z molekul, atomů, atd.) může záření buď pohlcovat (absorbovat), nebo vysílat (emitovat). Emise může být buď samovolná (spontánní), nebo vynucená (stimulovaná). Při absorpci fotonu přejde elektron z nižší energetické hladiny na vyšší, na níž má energii větší o energii pohlceného fotonu, dojde k tzv. excitaci. Naopak při přechodu elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší dojde k vyzáření fotonu. Schéma přechodů mezi dvěma energetickými hladinami viz obr. 4. Energie fotonů se počítá dle vztahu 1.1.

$$h \cdot f_{12} = E_{12} \quad (1.1)$$

Kde:	h	- Planckova konstanta – $6,63 \cdot 10^{-34}$	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$
	f_{12}	- frekvence kmitání odpovídající přechodu $E_1 - E_2$	$[\text{s}^{-1}]$
	E_{12}	- přechod z energetické hladina E_1 na hladinu E_2	$[\text{J}]$



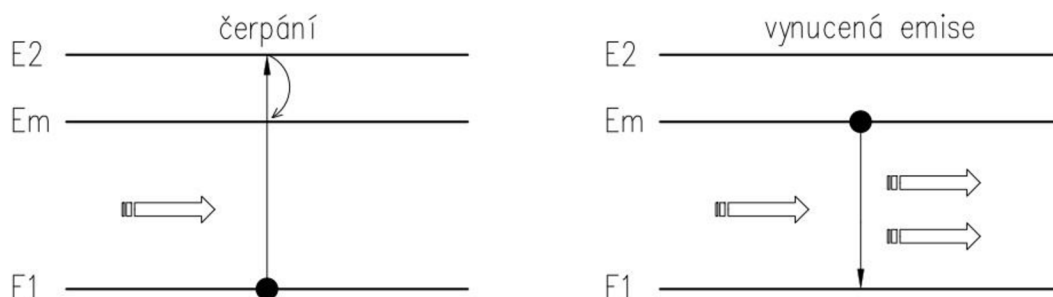
Obr. 4 Schéma přechodů mezi dvěma energetickými hladinami [23]

Pro vytvoření laserového paprsku potřebujeme vytvořit nerovnovážný stav, kdy bude více atomů na vyšších energetických hladinách než na nižších hladinách. Pokud toto bude splněno, hovoříme o populační inverzi a těleso nazýváme aktivním prostředím. Mezi dvě hladiny musíme vložit ještě třetí hladinu, tzv. pracovní. Tím atomy budou bez vyzáření fotonů padat

z horní hladiny na hladinu pracovní, kde bude počet elektronů větší než na hladině spodní, a tím se vytvoří žádané aktivní prostředí (viz vzorec 1.2). Takže v aktivním prostředí musí být minimálně tři energetické hladiny. Na obr. 5 je znázorněno schéma tří energetických hladin.

$$n_m > n_l \tag{1.2}$$

Kde: n_1 - počet atomů na základní (spodní) energetické hladině [-]
 n_m - počet atomů na pracovní hladině [-]



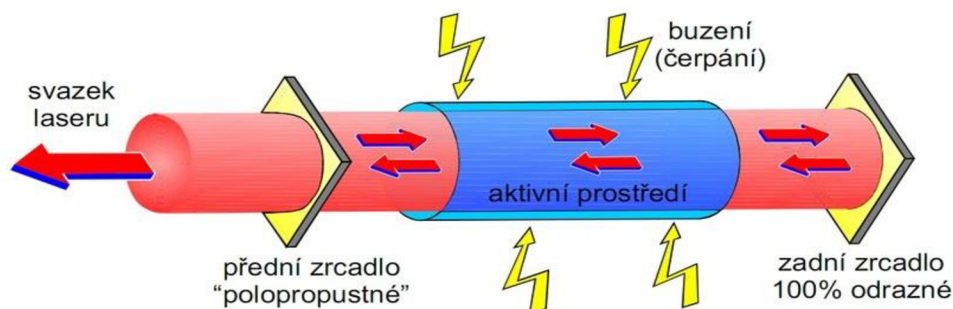
E_1 – Horní energetická hladina
 E_2 – Spodní energetická hladina
 E_m – Pracovní energetická hladina

Obr. 5 Schéma tří energetických hladin [12]

Atom postupně přechází z hladiny E_2 na hladinu E_m a po nějakém čase odtud přechází na hladinu E_1 . Při tomto přechodu vyzáří foton. Pokud je tedy splněna podmínka 1.2, tak nastává hromadění atomů v excitovaném stavu na hladině E_m . Excitovaný atom po setkání s fotonem stimulujícího záření vyzáří další foton shodného záření. Tento proces má charakter řetězové reakce. Dále je tento proces zesilován optickým rezonátorem.

1.1.1 Optický rezonátor [25], [30]

Optický rezonátor (viz. Obr. 6) je vytvořen dvěma zrcadly a aktivním prostředím. Protější zrcadla musí být navzájem přesně kolmo na osu tyčinky. Jedno zrcadlo je nepropustné a druhé je polopropustné. Stimulované fotony se odrážejí od zrcadel sem a tam a stimulují další vybuzené atomy. Intenzita světla uvnitř tyčinky postupně narůstá. Když intenzita světla přesáhne určitou mez, tak polopropustným zrcadlem vyrazí ven jako laserový paprsek.



Obr. 6 Optický rezonátor [25]

1.2 Rozdělení laserů [28]

Používá se mnoho druhů laserů, ty se ale liší svou konstrukcí i vlastnostmi. Proto se tyto lasery dělí podle různých kritérií do skupin:

- Podle aktivního prostředí
 - Pevnolátkové lasery
 - Plynové lasery
 - Kapalinové lasery
 - Polovodičové lasery
 - Plazmatické lasery
- Podle vlnových délek optického záření, které vysílají
 - Infračervené lasery
 - Lasery viditelného pásma
 - Ultrafialové lasery
 - Rentgenové lasery
- Podle typu buzení – lasery buzené
 - Opticky
 - Elektronovým svazkem
 - Tepelnými změnami
 - Rekombinací
 - Injekcí nosičů náboje
- Podle režimu práce
 - Pulzní
 - S dlouhými impulsy
 - S krátkými impulsy
 - S velmi krátkými impulsy
 - Kontinuální

1.2.1 Pevnolátkové lasery [9], [23], [28], [30]

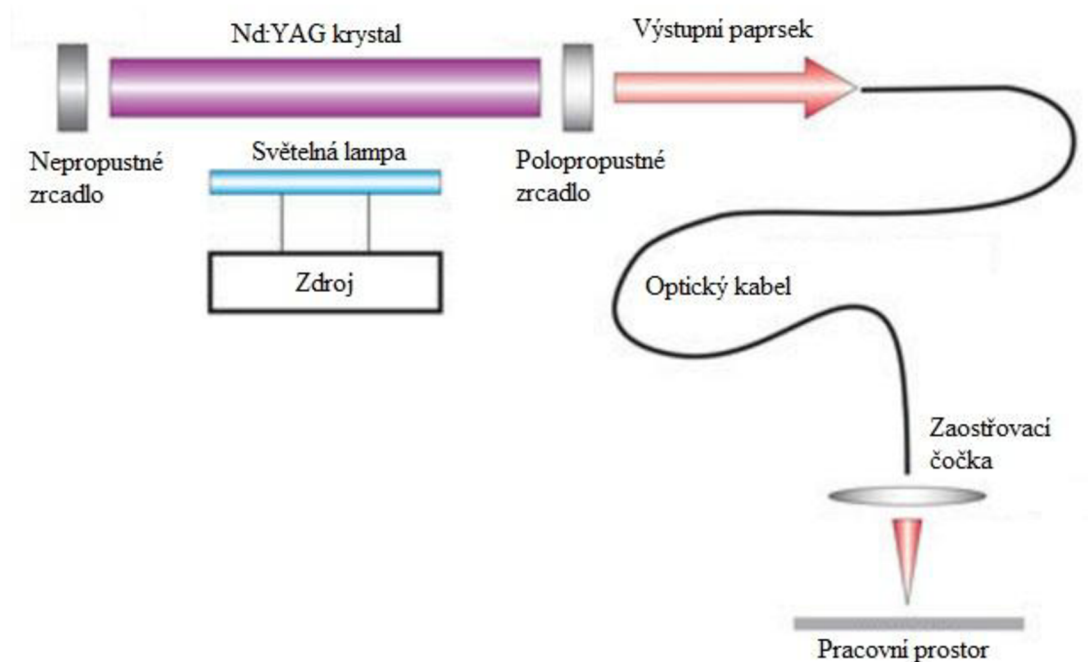
Aktivní prostředí těchto laserů jsou krystalické nebo amorfní izolanty s příměsí vhodných iontů. Tyto lasery mají záření vlnové délky blízko infračerveného a viditelného světla. Základem těchto laserů je laserová hlavice, která obsahuje aktivní materiál, budící elementy, budící dutinu a otevřený rezonátor. Buzení se nejčastěji provádí výbojkami, nebo laserovými diodami. Účinnost těchto laserů je velmi malá, pohybuje se v rozmezí 2-5%. Maximální výkon laserů je 6kW. Pevnolátkové lasery mohou pracovat ve dvou provozech:

- Kontinuální režim
- Pulzní režim

Mezi nejznámější pevnolátkové lasery patří:

- Rubínový laser
- Nd:YAG laser

Na obrázku 7 je schéma Nd:YAG laseru.



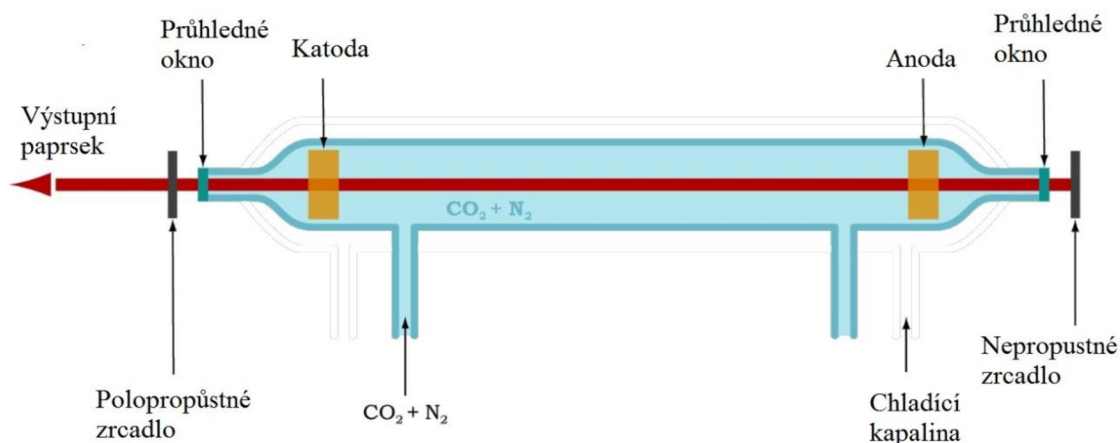
Obr. 7 Schéma Nd:YAG laseru [9]

1.2.2 Plynové lasery [23], [30], [37]

Aktivní prostředí těchto laserů je v plynné fázi. Plynové lasery pracují převážně v kontinuálním režimu. Účinnost laserů je v rozmezí 10-15% a maximální výkon může být až 100 kW. Zdrojem energie pro čerpání aktivního prostředí je stejnosměrný, nebo vysokofrekvenční výboj, který hoří v trubici naplněné aktivním plynem. Aktivní prostředí je nejčastěji tvořeno směsí plynů $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Mezi nejznámější laser patří:

- CO_2 laser

Na obrázku 8 je schéma CO₂ laseru.



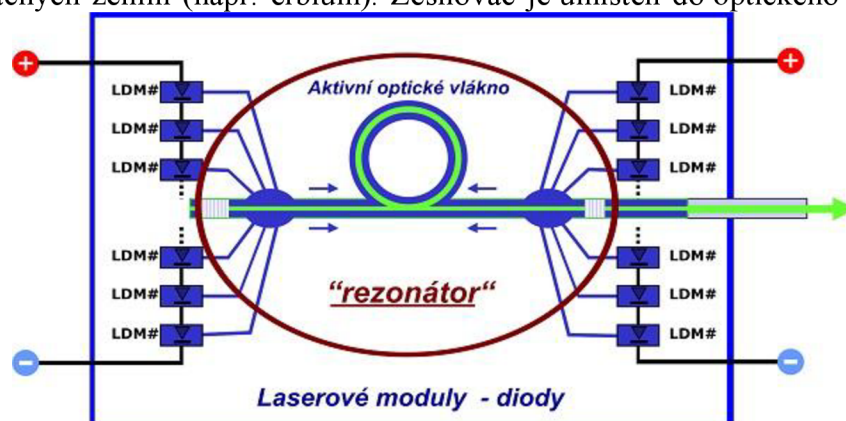
Obr. 8 Schéma CO₂ laseru [37]

1.2.3 Polovodičové lasery [24], [30]

Aktivní prostředí je tvořeno polovodičovým materiálem, kde dochází k injekci elektronů a děr. V polovodičovém aktivním prostředí je možno dosáhnout velkého optického zesílení, proto jsou rozměry aktivního elementu malé, od 0,05 mm do 1 mm. Hlavní výhodou těchto laserů je velká účinnost, až 50% a velké rozmezí vlnových délek podle aktivního prostředí od 300 do 30 000 nm. Nevýhodou je velká rozbíhavost generovaného záření a chlazení těchto laserů.

1.2.4 Vláknové lasery [1], [21], [24], [30]

Vláknové lasery (obr. 9) začínají postupně nahrazovat starší typy laserů a nacházejí stále větší uplatnění v mnoha oborech. Tyto lasery jsou vlastně speciální typy pevnolátkových laserů. Skládají se z koherentního optického zesilovače. Zesilujícím médiem je optické vlákno, dopované prvky vzácných zemin (např. erbium). Zesilovač je umístěn do optického rezonátoru. Rezonátor má dvě zrcadla, jedno nepropustné a druhé polopropustné, kterým prochází výstupní laserové záření. Vláknové lasery mají vysokou účinnost 25-30% a výkon až 50 kW.

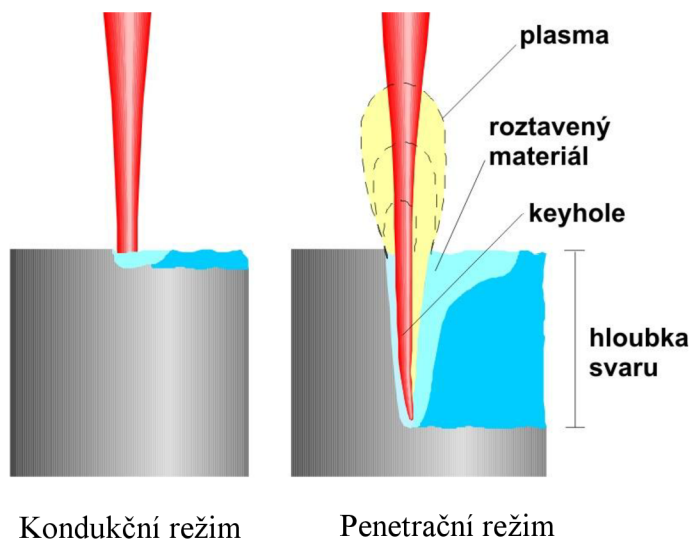


Obr. 9 Schéma vláknového laseru [21]

1.3 Princip laserového svařování [21], [22], [24], [31]

Při svařování laserem dochází k rychlému lokálnímu ohřevu, díky vysoké plošné hustotě záření laserového svazku. Podle hodnoty hustoty záření rozlišujeme dva způsoby svařování (Obr 10):

- Kondukční režim
- Penetrační režim



Obr. 10 Princip laserového svařování [31]

1.3.1 Kondukční režim [21], [22], [31]

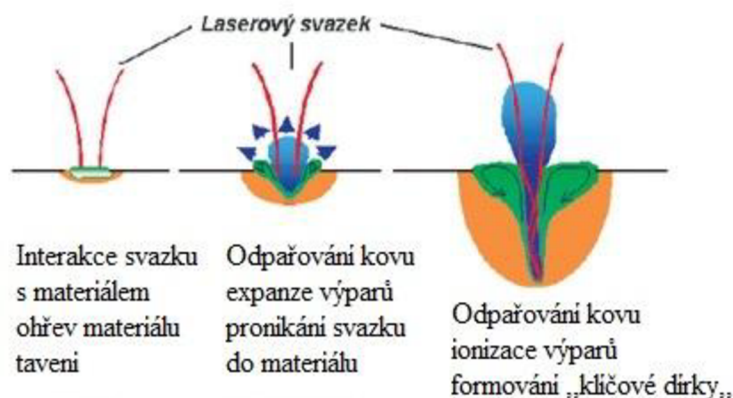
Při tomto režimu je hustota záření natolik nízká, že dochází pouze k natavení povrchu materiálu. Teplota tavné lázně je přibližně stejná, jako teplota tání kovu, takže dochází jen k malému odpařování kovu. Po zchladnutí má svar typický čokovitý tvar. Tento režim se používá pro svařování tenkých plechů.

1.3.2 Penetrační režim [21], [22], [31]

Při tomto režimu je hustota záření tak vysoká, že se vnesené teplo nestačí odvádět do objemu materiálu a materiál se okamžitě odpaří. Při vhodném zkombinování svařovacích parametrů vzniká tzv. „klíčová dírka“ (anglicky – keyhole). Vznik klíčové dírky je znázorněn na obrázku 11. V klíčové dírce dochází k vícenásobnému odrazu laserového svazku.

Vzniklá dutina („klíčová dírka“) je naplněna parami odpařujícího se materiálu a stěny této dutiny jsou tvořeny roztaveným materiálem.

Při postupu laserového svazku dochází za dutinou ke svaření materiálu vlivem povrchových napětí. Tento režim se používá pro svařování materiálů různých tloušťek bez úpravy povrchu, bez přídavného materiálu a na jeden průchod plným průvarem.



Obr. 11 Vznik „klíčové dírky“ [22]

1.4 Svařovací metody [13], [35]

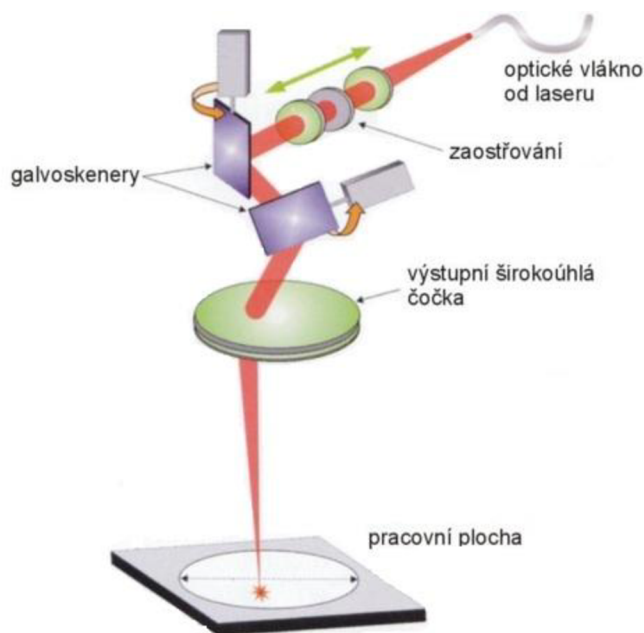
Dnes existuje několik metod laserového svařování. V automobilovém průmyslu se čím dál tím víc uplatňují tyto dvě moderní svařovací metody:

- Svařování na dálku „Remote welding“
- Hybridní laser – obloukové svařování

1.4.1 Svařování na dálku („Remote welding“) [12], [19], [20], [28], [29], [34], [35], [36]

V některých literaturách se toto svařování označuje jako „Scanner Welding“. Toto svařování se začíná nejvíce uplatňovat v automobilovém průmyslu. Jak je z názvu tohoto laseru patrné, tento způsob svařování umožňuje svařovat na vzdálenost až několik desítek centimetrů. Využívají se zde vláknové lasery.

Na obrázku 12 je znázorněno schéma svařování na dálku. Paprsek je provázen jedním nebo dvěma naklápěcími zrcadly a zaostřovací jednotkou. Zrcadla a zaostřovací jednotka mohou provést extrémně rychlou, ale zároveň velmi přesnou změnu úhlu, nebo přímočarého pohybu. Velikost pracovního prostoru je určena vzdáleností mezi optikou a pracovním prostorem, a také na ohniskové vzdálenosti zaměřující se čočky. Vzdálenost ohniskového bodu v celém pracovním prostoru zůstane konstantní. Tato metoda byla použita pro svařování vzorků, které budou vyhodnoceny v kapitole 4.



Obr. 12 Schéma svařování na dálku [36]

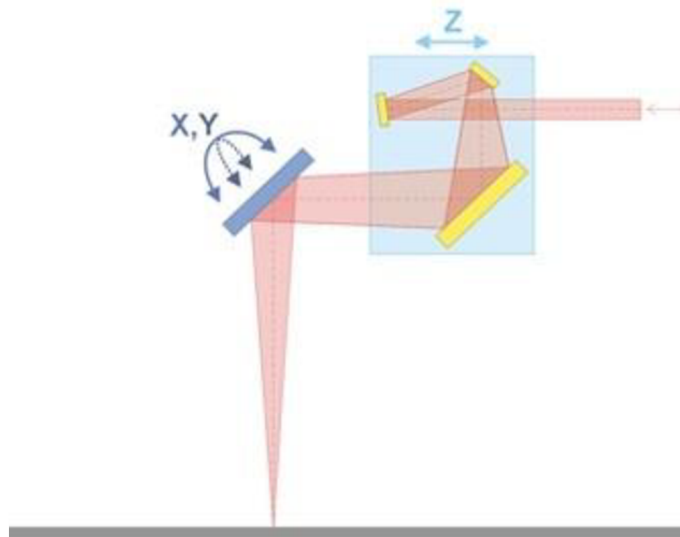
Výhody tohoto svařování:

- Krátké výrobní časy díky rychle se pohybujícím zrcadlům
- Laserový paprsek potřebuje jen několik ms při přechodu z jednoho svaru na druhý, takže pracuje téměř nepřetržitě
- Vysoká flexibilita umožňuje svařování různých tvarově složitých součástí
- Velké svařovací vzdálenosti

Rozeznáváme dva typy snímačů, které přivádějí laserový paprsek do pracovního prostoru.

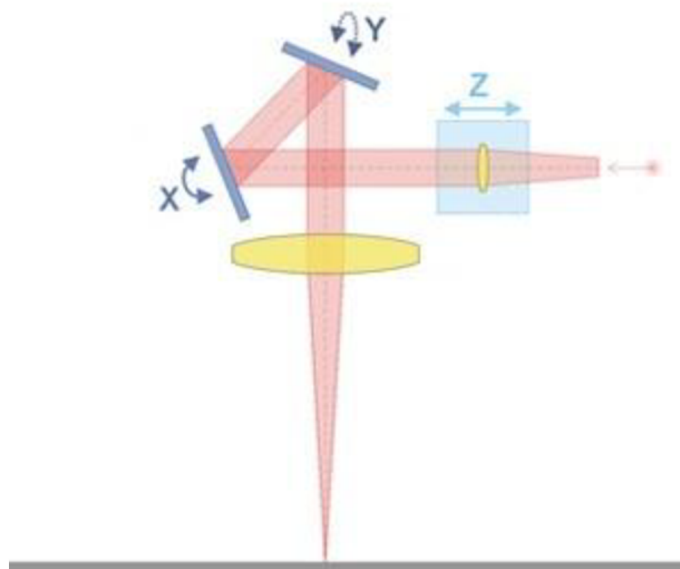
- Jedno - zrcadlový snímač
- Dvou - zrcadlový snímač

U jedno - zrcadlového typu snímače je zrcadlo podporováno ve dvou osách a je umístěno až za zaostřovací jednotkou. Zaostřovací jednotka je přesně vedena podél osy z proto, aby udržela stálý zaostřený paprsek v celém procesu. Schéma tohoto typu snímače je na obrázku 13.



Obr. 13 Jedno – zrcadlový snímač [34]

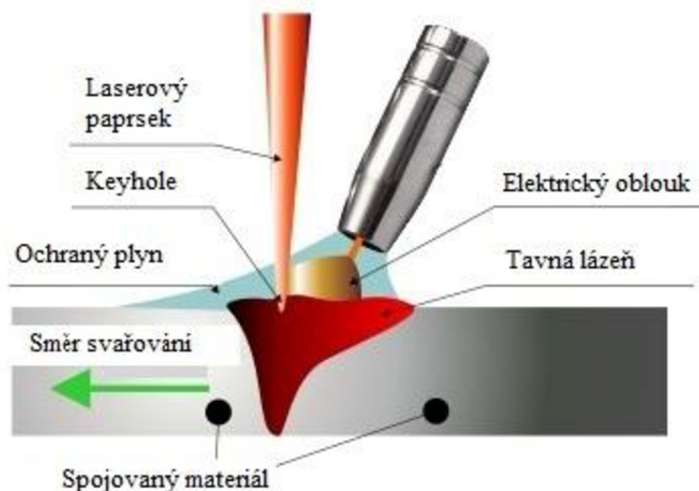
U dvou - zrcadlového typu snímače jsou vychylovací zrcadla umístěna před zaostřovací jednotkou. Každé zrcadlo slouží k naklápění v jedné souřadnici. Zaostřovací jednotka je navržena tak, aby laserový paprsek byl zaměřen se stejnou silou v každém bodu pracovní oblasti. Ohnisková vzdálenost může být posunuta ve svislé poloze přidáním optické čočky do paprsku laseru. Schéma tohoto typu snímače je na obrázku 14.



Obr. 14 Dvou – zrcadlový snímač [34]

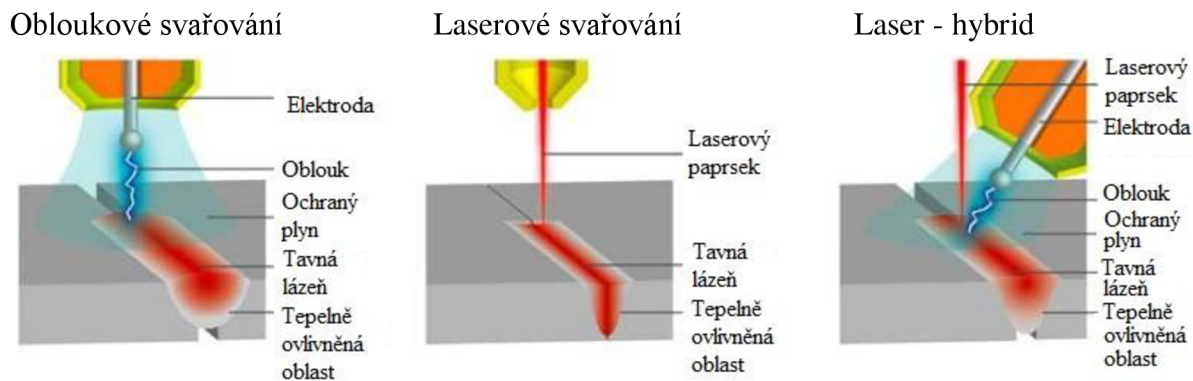
1.4.2 Hybridní laser – obloukové svařování [10], [11], [13], [15]

Tento typ svařování je kombinace dvou svařovacích procesů, laserového svařování a obloukového svařování (Obr. 15). Nejběžnější spojení jsou laser – MIG/MAG, nebo laser – TIG. Hlava pro laser – obloukové svařování je zobrazena na obrázku 17. Tento proces kombinuje samostatné výhody obou metod, jaké jsou např. vyšší svařovací rychlosti, úspora výrobního času, vzhledově lepší svařovaný povrch a snížení pórovitosti po svařování. Zdroje laserového paprsku mají výkon 2-4 kW a svařovací rychlosti se pohybují okolo 4 metrů za minutu. Touto metodou se obvykle svařují plechy tloušťky od 2 do 10 mm.



Obr. 15 Schéma Hybridního laser – obloukového svařování [11]

Tato metoda našla své uplatnění i v automobilovém průmyslu. Galvanizované ocelové plechy, které se používají pro kostru auta, jsou povrchově chráněny zinkem proti korozi. Svařování samotným laserem způsobuje odpaření zinku a vzniklé páry způsobují pórovitost svaru. Použitím hybridního laser – obloukového svařování je vrstva zinku předem odstraněna obloukem, takže se páry zinku nedostanou do svaru a nedochází k pórovitosti svaru. Rozdíly mezi svařováním obloukem, laserem a laser – hybridem jsou na obrázku 16.

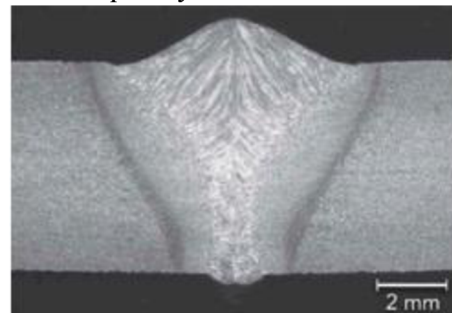


Obr. 16 Rozdíly svařovacích metod [10]



Obr. 17 Hlava pro hybridní laser – obloukové svařování od firmy Fronius [15]

Na obrázku 18 je řez svarem, který má typickou geometrii pro hybridní laser – obloukové svařování. Úzký kořen svaru je způsoben laserem a obloukové svařování způsobí rozšíření hlavy svaru do tvaru Y.

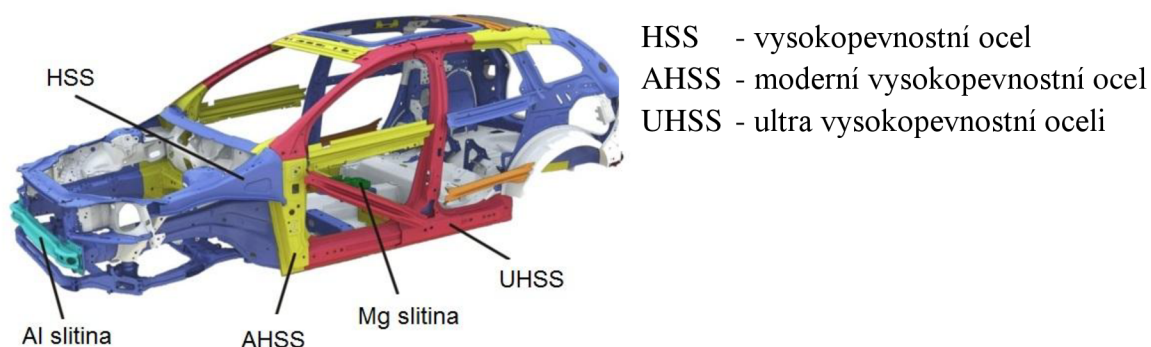


Obr. 18 Řez svarem po hybridním laser – obloukovém svařování [10]

2 OBLASTI VYUŽITÍ LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [14], [19], [26], [32], [33], [35]

S laserem se dnes setkáváme v mnoha oblastech různých oborů. Asi nejpoužívanější oblast je ve strojírenském průmyslu. Mezi nejčastější použití laseru ve strojírenství patří tepelné zpracování laserem, řezání lesem a samozřejmě laserové svařování. Laserového svařování se v posledních deseti letech začalo hodně používat v automobilovém průmyslu, konkrétně při svařování karosérií aut, kde z velké části nahradilo klasickou metodu odporového bodového svařování. Mezi nejmodernější svařovací technologie se řadí laserové svařování na dálku a hybridní laser - obloukové svařování.

V automobilovém průmyslu se klade velký důraz na snižování hmotnosti, při zachování pevnosti a zvýšení bezpečnosti. Proto se stále vyvíjejí nové moderní materiály. Z obrázku 19 je vidět, že karosérie aut jsou skládané z těchto moderních materiálů a většina z nich jsou těžko svařitelné, např. vysokopevnostní oceli. Klasickými svařovacími metodami je obtížné svařit tyto materiály, proto se začal používat laser.



Obr. 19 Materiály karosérie auta Volvo XC60 [26]

Svařovací pracoviště se skládá z laserového zdroje, svařovacího robota, kde na konci ramene je umístěna svařovací hlava. Laserový paprsek je přiváděn ze zdroje do svařovací hlavy pomocí optického kabelu. Svařovaný vzorek je umístěn v pracovním prostoru. Umístění vzorku musí být velmi přesné, proto se používají různé přípravky, aby bylo docíleno stále stejné polohy při výměně svařovaného vzorku. Nebo se využívá jako polohovací nástroj další robot, viz obr 20.



Obr. 20 Svařovací pracoviště

Typickým použitím je svařování dveří (obr. 21), bočních stěn, podlahových sestav, předních a zadních částí automobilu. Díky laserovému svařování lze redukovat velikost přírub, zvýšit tuhost celé karosérie, a tím i ušetřit materiál.



Obr. 21 Dveře automobilu svařované laserem [33]

3 OBECNÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP SVAŘOVÁNÍ [32]

V této kapitole je popsán obecný technologický postup svařování automobilu. Nejpoužívanější materiál na karoserie aut je ocelový hlubokotažný plech. Plechy jsou zpracovány na požadovaný tvar, který je už při konstrukci navrhnutý tak, aby se tyto díly při sestavení překrývaly a vznikl přeplátovaný svarový spoj. Celá sestava karoserie auta je ještě rozdělena do podskupin, které tvoří podlaha auta, přední a zadní díl, střecha, dveře a kapota.

3.1 Přípravky a polohovadla [4], [5], [16]

Při sestavování jednotlivých dílů se musí použít různé přípravky a polohovadla, aby byla zajištěna přesná poloha při svařování a hlavně stejná poloha i při výměně celého dílce. Tyto přípravky se používají hlavně v hromadné a velkosériové výrobě a jsou určeny jen pro jeden typ dílce. Přípravek musí být řešen tak, aby byl možný snadný přístup svařovacího paprsku do místa svaru. Přípravky jsou tvořeny:

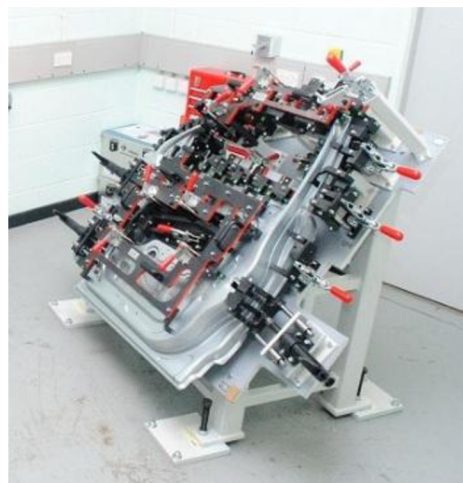
- Pracovními stoly
- Ustavovacími prvky
- Upínacími prvky

Nejčastějšími upínacími prvky jsou rychloupínky, kdy se pro upínání využívá kloubového mechanismu. Ten je ovládán buď silou pracovníka, nebo pneumatickým, elektrickým a hydraulickým systémem. Rychloupínky jsou využívány převážně na robotizovaných pracovištích. Na obrázku 22 je zobrazena mechanická rychloupínka.



Obr. 22 Mechanická rychloupínka [16]

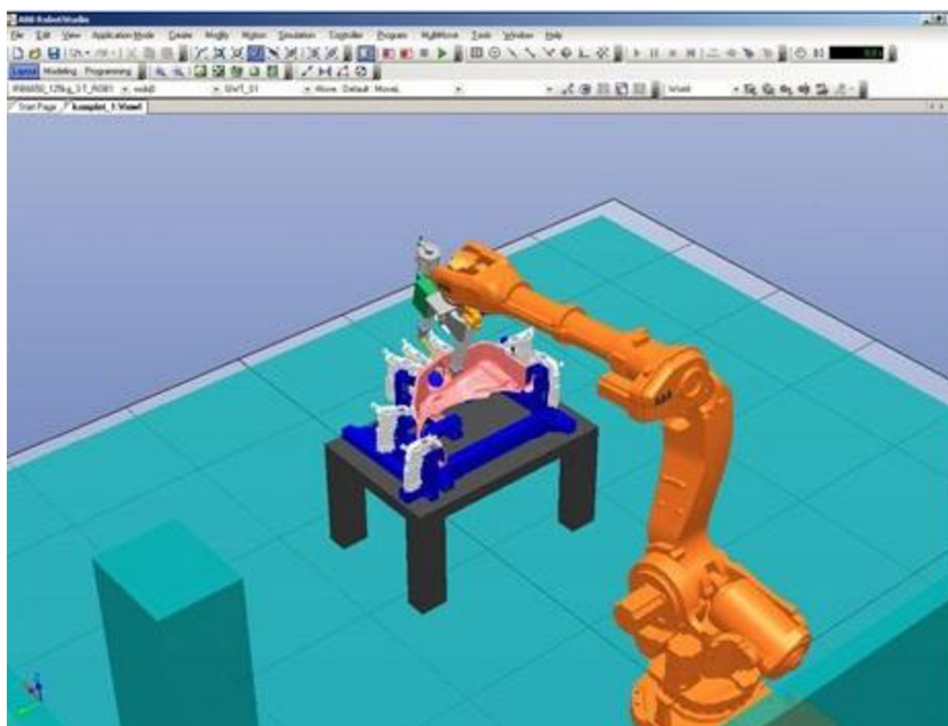
Dalšími pomocnými prvky jsou polohovadla, která pomáhají ustavit svarek do nejvýhodnější svařovací polohy. Polohovadla jsou sestavena z pevného rámu, na kterém je umístěna pracovní část polohovadla. Pracovní část je tvořena z různých rotačních a posuvných mechanismů a ty tvoří vzájemné kombinace. Celý svařovací přípravek je zobrazen na obrázku 23.



Obr. 23 Svařovací přípravek [4]

3.2 Programování svařovacího robota [7]

Programování svařovacích robotů se provádí na speciálních simulačních programech. Do programu se vloží model svaru, svařovacího robota a také model svařovacího přípravku. Po vložení těchto modelů vznikne virtuální model svařovacího pracoviště (Obr. 24). Model přípravku je velmi důležitý, protože se v programu také kontrolují kolize mezi svařovacím přípravkem a svařovací hlavou robota, a také jestli nějaké části přípravku nezasahují do místa svaru. Pomocí simulací se naprogramuje optimální trajektorie dráhy robota. Z této simulace se vytvoří program, ze kterého software vygeneruje NC kód. Tento kód je pomocí přenosných médií nahrán do řídicího systému robota. Výhodou těchto systémů je možnost kontroly programu v reálném čase. Dále je možnost měnit program, jsou-li objeveny nějaké problematické body. Neustálá optimalizace pohybu robota nám přispívá ke snižování pracovního času a tím zvyšuje produktivitu a efektivitu práce.



Obr. 24 Virtuální model svařovacího pracoviště v programu RobotStudio [7]

3.3 Kontrola svaru [5]

Kontrola svarů je velmi důležitá. Vady ve svarech jsou koncentrátoři napětí, které ovlivňují mez únavy materiálu a jsou také iniciátory křehkého lomu. Tyto vady musí být odhaleny před použitím dané součásti v provozu.

3.3.1 Vizuální metoda [5]

Jednou ze základní a nejjednodušší kontroly je vizuální kontrola. Jedná se o nedestruktivní metodu kontroly svaru. Touto kontrolou lze zjišťovat pouze povrchové vady, jakou jsou nepřijatelné nerovnoměrnosti převýšení svaru, zápaly, trhliny, studené spoje, vady v kořenové oblasti. Po této kontrole obvykle následují další nedestruktivní metody zkoušení svaru. Pokud

se svar nachází na dostupném povrchu, tak se kontrola provádí pouze okem, nebo jsou pro zvětšení použity lupy. Pokud se svar nachází na nedostupném povrchu, je nutno použít optické přístroje, tzv. endoskopy.

3.3.2 Penetrační metoda [5]

Další používaná metoda pro kontrolu svaru je penetrační metoda. Jedná se o nedestructivní metodu kontroly svaru. Pomocí této metody lze zjišťovat pouze povrchové vady. Penetračními metodami lze kontrolovat povrchové trhliny, studené spoje, zápaly a póry, ale nelze kontrolovat vady uzavřené a vady těsně pod povrchem. Fyzikální podstata penetračních metod je použití vhodných kapilárně aktivních kapalin, které proniknou do povrchových vad. Následně kapalina vzlíná vlivem kapilárních sil do nanesené vývojky a vady se zviditelní. Existují tři penetrační metody zkoušení:

- Metoda barevné indikace
- Metoda fluorescenční
- Metoda dvouúčelová

Tyto metody mají přesně daný postup zkoušky:

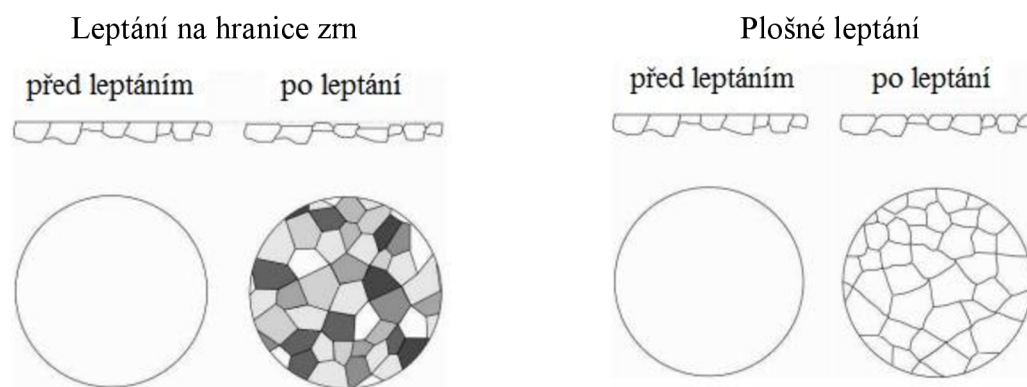
- Příprava povrchu
 - Očištění, odmaštění, osušení
- Nanese penetrantu na zkoušený povrch
 - Natíráním, nástřikem, ponorem
- Odstranění přebytku penetrantu
 - Oplach vodou, ošetření vlhkou houbou
- Vyvolání indikace
 - Nanese vývojky → natíráním, nástřikem, ponorem
- Vyhodnocení
 - Vizuální kontrola ihned po nanese vývojky

3.3.3 Optická metalografie [27]

Optická metalografie je obor, ve kterém se zkoumají metalografické vzorky pomocí optických zařízení a to převážně pomocí světelných mikroskopů. Na metalografickém vzorku se zkoumá struktura materiálu (mikrostruktura). U vzorku, který byl svařen, se zkoumá výsledná struktura svarového kovu a tepelně ovlivněná oblast. K zviditelnění výsledné struktury se musí provést několik operací. Jako první je odběr vzorku, následně preparace vzorku, broušení, leštění, leptání a hodnocení.

- Odběr vzorku se provádí většinou pomocí řezání. Při odběru se nesmí ovlivnit výsledná struktura materiálu vlivem tepelného a mechanického namáhání. U svarů se nejčastěji odebírá vzorek řezem kolmo na osu svaru.

- Preparace malých vzorků se provádí zalitím za studena nebo zalisováním za tepla. Při zalití za studena se vzorek vloží zkoumanou plochou na dno formy, která se zalije hmotou, která se následně vytvrdí. Zalisování vzorku za tepla probíhá podobně. Vzorek se vloží zkoumanou plochou na dno tlakové komůrky, zasype se pryskyřicí ve formě prášku a v teplotě 100 až 180 °C pod tlakem až 50 kN se vzorek zalisuje.
- Broušení vzorku se provádí ručně nebo mechanicky. Vzorek je přitlačován na brusný papír. Při broušení je potřeba chlazení, aby nedošlo ke změně struktury, vlivem tepelného namáhání jako u řezání vzorku. Broušení může být velmi hrubé, hrubé a jemné a to závisí na velikosti částic brusiva na brusném papíru. Při broušení dochází k úbytku materiálu. Po broušení následuje leštění.
- Při leštění už nedochází k úbytku materiálu, ale pouze vyhlazení vrcholů drsnosti povrchu. Leštění se provádí mechanicky nebo elektrolyticky. Mechanické leštění je podobné jako mechanické broušení. Vzorek se přitlačuje na leštící kotouč, na který je nanášeno leštící médium. Leští se tak dlouho, dokud leštěná plocha nedosáhne zrcadlového povrchu. Po leštění se vzorek opláchne a je připravený na leptání.
- Pomocí leptání se vyvolá na vzorku mikrostruktura. Podle materiálu vzorku se vybírá způsob leptání. Nejčastěji se používá leptání na hranice zrn, plošné leptání a selektivní leptání. Po leptání následuje vyhodnocení mikrostruktury vzorku. Leptání na hranice zrn a plošné leptání je znázorněno na obrázku 25.



Obr. 25 Leptání plošné a na hranice zrn [27]

- K vyhodnocení struktury se používají převážně světelné mikroskopy při maximálním zvětšení 1000x. U svarů se zkoumá směr a velikost zrna ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti a také šířka tepelně ovlivněné oblasti.

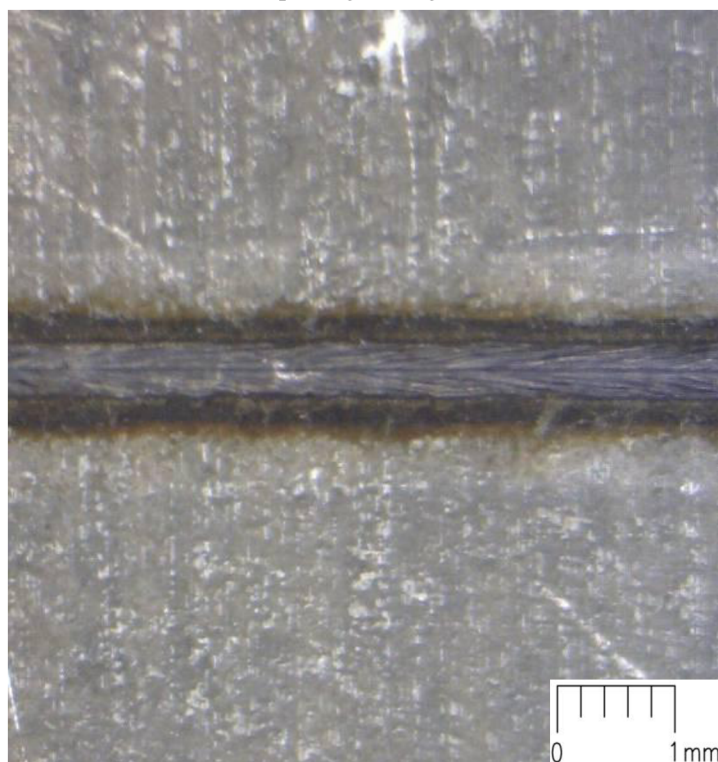
4 VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ A ROZBOR VZORKU [6]

Vzorek byl svařen metodou laserového svařování na dálku. Jelikož tato metoda není v České republice tolik rozšířená, tak použitý vzorek pro tuto bakalářskou práci byl získán na mezinárodní výstavě LASER World of PHOTONICS od firmy TRUMPF, takže údaje o technologických parametrech nejsou přesně známy. Typ svaru přepřátovaný spoj, tloušťka plechu 0,8 mm. Materiál plechu je ocel S460NL (1.8903), jemnozrná konstrukční ocel, normalizačně žíhaná. Mez pevnosti v tahu 720 MPa, mez kluzu 460 MPa. Tento materiál se používá v automobilovém průmyslu, pro výrobu dílů karosérie. v tabulce 1 je uvedeno chemické složení tohoto materiálu. Plech je povrchově upraven pozinkovanou vrstvou.

Tab. 1 Chemické složení oceli S460NL [6].

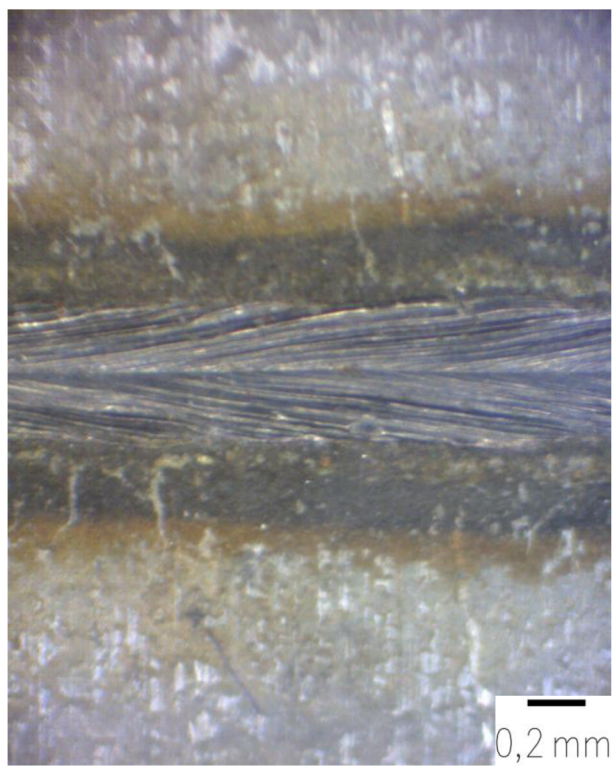
C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr
0,20	0,60	1,00-1,70	0,03	0,025	0,020	0,025	0,30
Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Nb+Ti+V	Mo+Cr
0,55	0,10	0,05	0,80	0,05	0,20	0,22	0,30

Na obrázku 26 lze vidět svar shora. Je to přesný rovný svar.



Obr. 26 Pohled na svar shora

Na obrázku 27 je přiblížený pohled na svar shora, kde už je vidět výrazná šipovitá kresba svaru, která je vytvořena díky velké svařovací rychlosti. Jakost svaru je velmi dobrá, svaru je celistvý, bez viditelných defektů. Kolem svaru je opálený zinek. Na povrchu svaru se vytvořila tenká zoxidovaná vrstva. Tento proces je velmi podobný technologickému procesu černění, kde je vrstva oxidů a hydroxidů železa vytvořena silně zásaditým hydroxidem sodným.



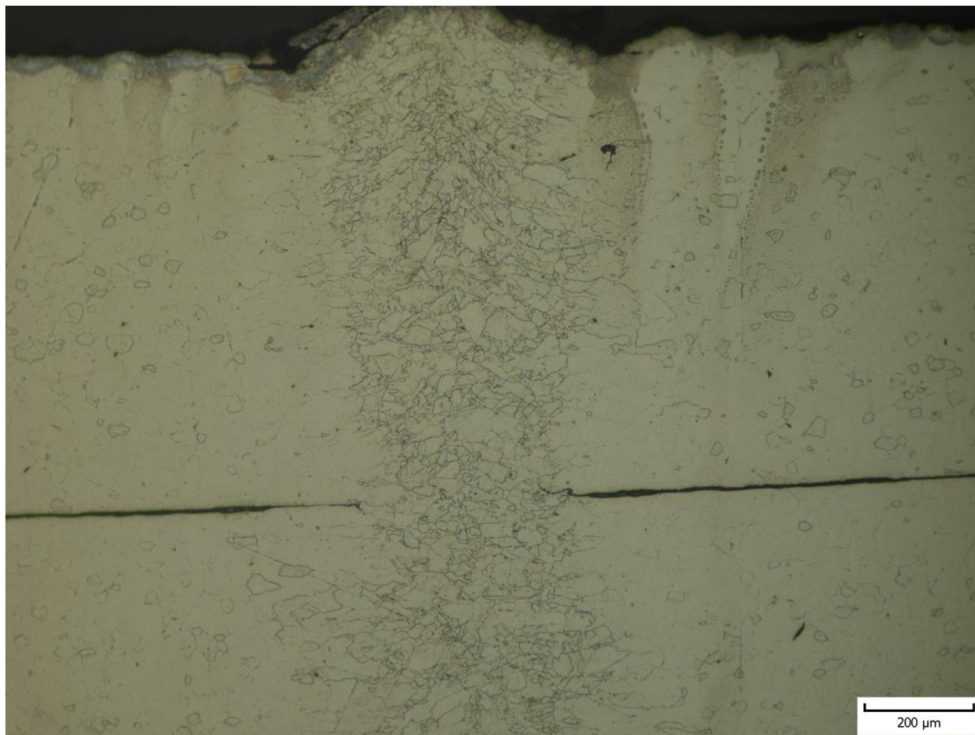
Obr. 27 Přiblížený pohled na svar shora

Na obrázku 28 je pohled na kořen svaru. Kořen svaru je celistvý, bez viditelných defektů.



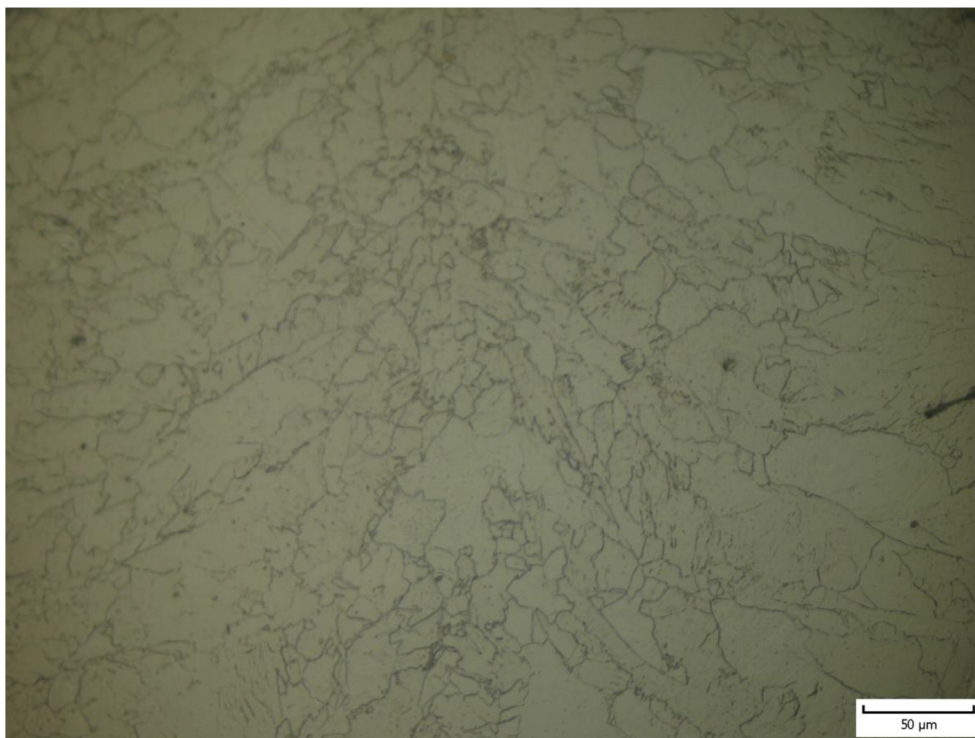
Obr. 28 Pohled na kořen svaru

Vzorek byl následně rozřezán a byl proveden metalografický výbrus. Na obrázku 29 je pohled na celý svar vybroušeného a naleptaného vzorku. Je vidět, že došlo k provaření obou plechů. Šířka svaru je přibližně 0,3 mm. Poměr výšky a šířky svaru je 5,3. Svar téměř bez tepelně ovlivněné oblasti.



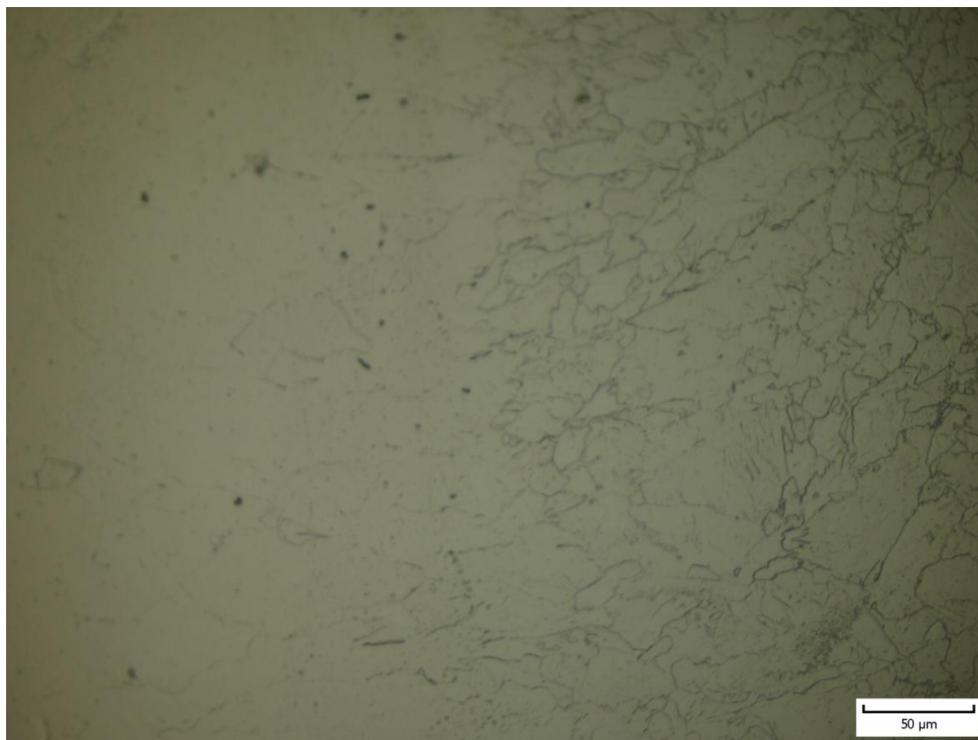
Obr. 29 Pohled na svar po metalografickém výbrusu

Na obrázku 30 je vidět svarový kov. Orientace zrn je směrem od základního materiálu do osy svaru.



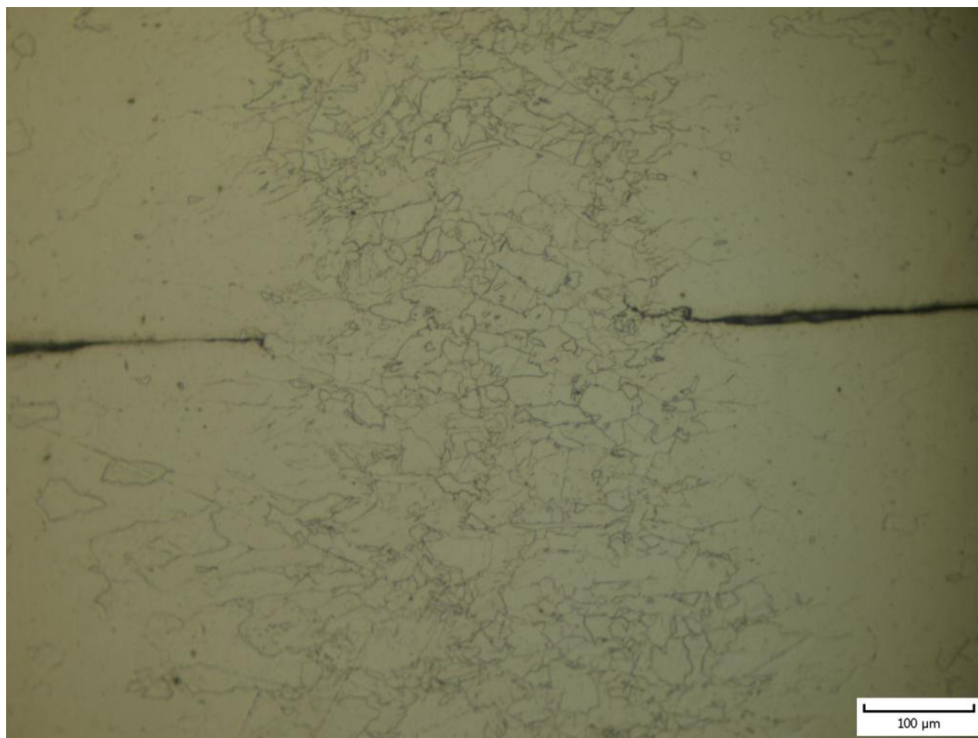
Obr. 30 Pohled na svarový kov

Na obrázku 31 je vidět přechod mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí. Tepelně ovlivněná oblast je minimální. Je to z důvodu velké svařovací rychlosti, kdy nedošlo k výrazné změně teploty základního materiálu kolem svaru.



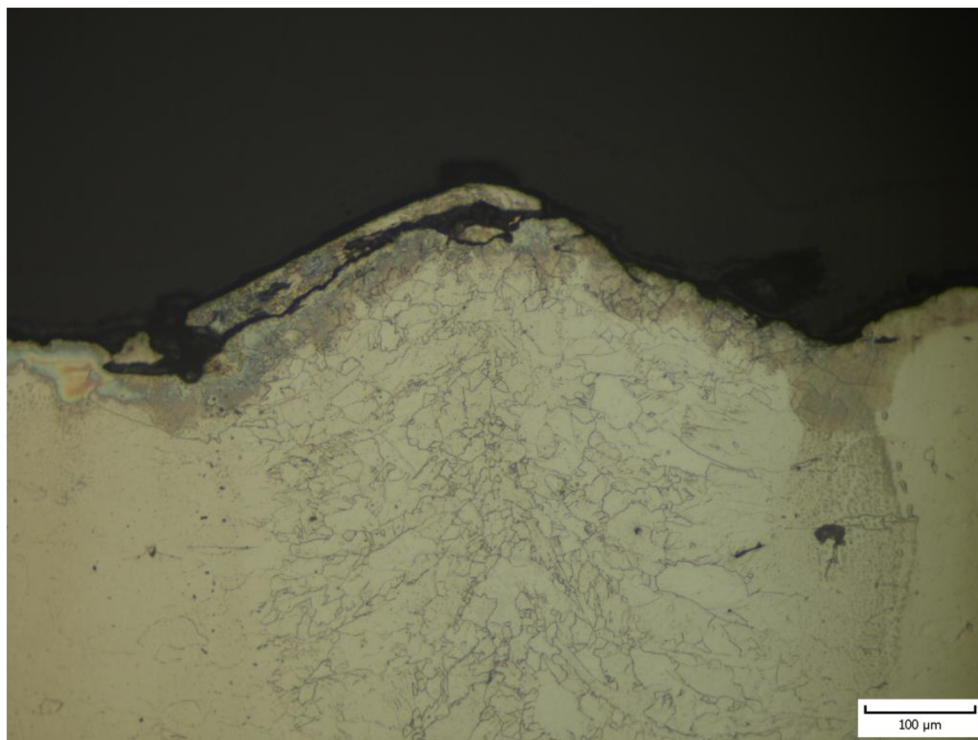
Obr. 31 Přechod mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí

Na obrázku 32 je přiblížený pohled na svarový kov v přechodu mezi plechy.



Obr. 32 Svarový kov v přechodu mezi plechy

Na obrázku 33 je vidět pohled na horní část svaru. Povrch svaru je tvořen oxidy železa v tloušťce cca 50 μm . V levé části jsou částečně oddělené. Svar vykazuje mírné převýšení přibližně 150 μm .



Obr. 33 Pohled na horní část svaru

Na obrázku 34 je vidět přechod mezi základním materiálem a vrstvou zinku. Vrstva zinku chrání plech proti korozi.



Obr. 34 Přechod mezi základním materiálem a vrstvou zinku

5 TECHNOLOGICKÝ POSTUP WPS [2]

Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, vzorek byl získán od firmy TRUMPF, a tak technologické parametry uvedené v technologickém postupu WPS jsou pouze teoretické hodnoty, získané z odborného článku. Vypracovaný technologický postup WPS naleznete v příloze 1.

6 ZÁVĚRY

V teoretické části této bakalářské práce jsou popsány dvě moderní metody laserového svařování, které se využívají v automobilovém průmyslu. První metoda hybridní laser – obloukové svařování a druhá je laserové svařování na dálku. Dále je popsáno využití metody laserového svařování na dálku pro svařování karosérií aut, a také je navrhnout obecný technologický postup svařování. Praktická část této práce se zabývá rozбором vzorku svařeného metodou svařování na dálku. Jelikož tato metoda svařování není v České republice příliš rozšířená, tak se mně nepodařilo prakticky svar provést, a proto je vzorek získán z mezinárodní výstavy LASER World of PHOTONICS od firmy TRUMPF, která se touto metodou svařování zabývá. Technologické parametry svařování nejsou proto přesně známy. Vzorek je tvořen dvěma plechy, které tvoří přeplátovaný svarový spoj, kde jeden plech má tloušťku 0,8 mm. Materiál plechu je ocel S460NL (1.8903), jemnozrná konstrukční ocel, normalizačně žíhaná. Mez pevnosti v tahu 720 MPa, mez kluzu 460 MPa. Plech je povrchově upraven pozinkovanou vrstvou. U vzorku je zkoumána jeho makrostruktura a mikrostruktura.

Zkoumaná makrostruktura ukázala, že svar je rovný a přesný. Při pohledu na svar shora je vidět výrazná šípovitá kresba, která vznikla díky velké svařovací rychlosti, která dosahuje až $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Povrch svaru je celistvý bez viditelných defektů. Po svaření se na povrchu vytvořila tenká černá zoxidovaná vrstva. Tento proces je velmi podobný technologickému procesu černění, kde je vrstva oxidů a hydroxidů železa vytvořena silně zásaditým hydroxidem sodným. Kořen svaru je celistvý bez viditelných defektů.

Vzorek je po zkoumání makrostruktury rozřezán. Řez je proveden kolmo na osu svaru a následně je proveden metalografický výbrus rozřezaného vzorku. Při zkoumání výsledné struktury svaru je zjištěno, že v okolí svarového kovu není téměř žádná viditelná tepelně ovlivněná oblast. Je to z důvodu velké svařovací rychlosti, kdy nedošlo k výrazné změně teploty základního materiálu kolem svaru. Povrch svaru je tvořen oxidy železa v tloušťce přibližně $50 \mu\text{m}$. Svar vykazuje mírné převýšení přibližně $150 \mu\text{m}$. Oba plechy jsou provařeny. Šířka svaru je přibližně $0,3 \text{ mm}$. Zrna ve svarovém kovu jsou orientována směrem od základního materiálu do osy svaru.

Svařování laserem tedy poskytuje velkou kvalitu svarového spoje, velkou svařovací rychlost, ale stále je velká pořizovací cena celého laserového zařízení. Proto se laserové svařování vyplatí v hromadné a velkosériové výrobě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [8]

1. AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. *Vláknové lasery* [online]. 2014 [cit. 2016-03-01]. Dostupné také z: http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.4956516915733742
 2. AUTO FOCUS ASIA. *Remote scanner welding* [online]. 2015 [cit. 2016-05-12]. Dostupné také z: <http://www.autofocusasia.com/production-manufacturing/remote-scanner-welding>
 3. AUTOMOTIVE MANUFACTURING SOLUTIONS. *Laser welding* [online]. 2014 [cit. 2016-05-20]. Dostupné také z: <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/technology/laser-welding-filling-the-gaps>
 4. AUTOMOTIVE MANUFACTURING SOLUTIONS. *Remote control: Laser welding* [online]. 2015 [cit. 2016-05-12]. Dostupné také z: <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/technology/remote-control>
 5. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. Svařování. ISBN 8085771721.
 6. BROWN MCFARLANE. *Yield Steel Plate* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné také z: <http://www.brownmac.com/products/460-yield-steel-plate/en-10025-3-s460n.aspx>
 7. CAD. *Off-line programování robotů pomocí simulačního programu RobotStudio* [online]. 2011 [cit. 2016-05-13]. Dostupné také z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2998-off-line-programovani-robotu-pomoci-simulacniho-programu-robotstudio.html>
 8. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>
 9. DIRECT INDUSTRY. *Nd:YAG laser* [online]. 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné také z: <http://www.directindustry.com/prod/ii-vi-infrared/product-37313-749735.html>
 10. DOC PLAYER. *Hybridní laserové technologie* [online]. 2013 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/4820148-Hybridni-laserove-technologie.html>
 11. EAGLE. *Hybrid welding* [online]. 2006 [cit. 2016-04-03]. Dostupné také z: <http://www.eagle-group.eu/en/hybrid-welding>
 12. ENCYKLOPEDIE FYZIKY. *Dvouhadinový a vícehadinový systém* [online]. 2016 [cit. 2016-02-28]. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/784-dvouhadinovy-a-vicehadinovy-system>
 13. FLEMMING OVE OLSEN. *Hybrid laser-arc welding*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009. ISBN 9781439802144.
-

14. FMA. *The evolution of scanners for remote welding applications* [online]. 2007 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: <http://www.thefabricator.com/article/lasercutting/the-evolution-of-scanners-for-remote-welding-applications>
 15. FRONIUS INTERNATIONAL. *LaserHybrid* [online]. 2014 [cit. 2016-05-16]. Dostupné také z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/79_687_ENG_HTML.htm#.VzmUXjdkjIU
 16. HANH-KOLB. *Horizontální rychloupínka* [online]. 2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné také z: http://www.hahn-kolb.cz/cz/katalog_detail.php?limit_od=36&id_sortiment_skupiny=974&podskupina=&VYROBCE=&hledany_nazev=&hledany_kod=&zobrazeni=&id_katalog=10812
 17. INDUSTRIAL LASER SOLUTION. *Hybrid laser arc welding* [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-1/features/hybrid-laser-arc-welding-has-its-time-arrived.html>
 18. INDUSTRIAL LASER SOLUTION. *Remote fiber laser welding* [online]. 2011 [cit. 2016-05-20]. Dostupné také z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/2010/02/remote-fiber-laser-welding-brazing-and-cutting.html>
 19. INDUSTRIAL LASER SOLUTION. *Remote laser welding in automotive production* [online]. 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-5/features/remote-laser-welding-in-automotive-production.html>
 20. ISTROJIRENSTVÍ. *Remote welding* [online]. 2008 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=remote-welding&id=22>
 21. ISTROJIRENSTVÍ. *Svařování laserem* [online]. 2008 [cit. 2016-03-13]. Dostupné také z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
 22. KONSTRUKCE. *Laserové svařování* [online]. 2006 [cit. 2016-03-13]. Dostupné také z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
 23. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 8085771810.
 24. LASERY A OPTIKA. *Seriál na téma lasery – Laserové svařování I* [online]. 2008 [cit. 2016-03-13]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
 25. LASERY A OPTIKA. *Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2013 [cit. 2016-02-28]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
 26. MATERIAL ENGINEER. *Kovové materiály automobilových konstrukcí* [online]. 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
-

27. MODERNÍ TECHNOLOGIE VE STUDIU APLIKOVANÉ FYZIKY. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. 2011 [cit. 2016-05-20]. Dostupné také z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
 28. MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 150 s. ISBN 9788073724399.
 29. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Laserové svařování* [online]. 2012 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-laserove-svarovani.html>
 30. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Princip laseru* [online]. 2012 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
 31. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Svařovací lasery* [online]. 2012 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
 32. STAVBA KAROSERÍ A SKŘÍNÍ. *Konstrukce skořepin karoserií* [online]. 2007 [cit. 2016-05-12]. Dostupné také z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27_Stavba_karoserii_a_skrini.pdf
 33. TRUMPF. *Aplikace laseru v karosárně* [online]. 2016 [cit. 2016-04-28]. Dostupné také z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/reseni-v-jednotlivych-odvetvich/automobil/karoserie.html>
 34. TRUMPF. *Scanner welding* [CD-ROM]. 2005 [cit. 2016-03-14].
 35. TRUMPF. *Scanner welding* [online]. 2016 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-welding/scanner-welding.html>
 36. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Technologie využívající laser* [online]. 2013 [cit. 2016-03-14]. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf
 37. WIKIMEDIA COMMONS. *Laser CO₂* [online]. 2011 [cit. 2016-03-01]. Dostupné také z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser_CO2.png
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
AHSS	Moderní vysokopevnostní ocel (Advanced High Strenght Steel)	[-]
E_1	Spodní energetická hladina	[-]
E_2	Horní energetická hladina	[-]
E_{12}	Přechod z energetické hladiny E_1 na hladinu E_2	[J]
E_m	Pracovní energetická hladina	[-]
f_{12}	Frekvence kmitání odpovídající přechodu E_1 - E_2	[s ⁻¹]
h	Planckova konstanta – $6,63 \cdot 10^{-34}$	[J.s]
HSS	Vysokopevnostní ocel (High Strenght Steel)	[-]
n_1	Počet atomů na základní (spodní) energetické hladině	[-]
n_m	Počet atomů na pracovní energetické hladině	[-]
UHSS	Ultra vysokopevnostní ocel (Ultra High Strenght Steel)	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

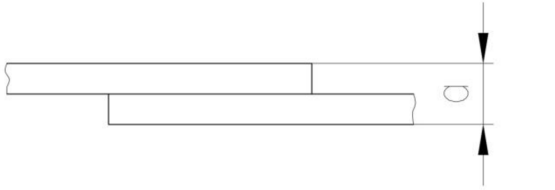
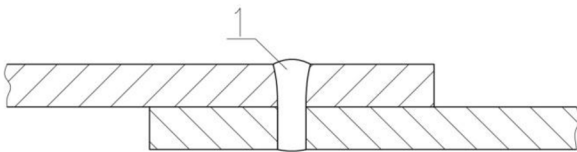
Obr. 1 Laserové svařování karosérie auta [3]	10
Obr. 2 Hybridní laser – obloukové svařování [17].....	10
Obr. 3 Svařování na dálku [18]	10
Obr. 4 Schéma přechodů mezi dvěma energetickými hladinami [23]	11
Obr. 5 Schéma tři energetických hladin [12]	12
Obr. 6 Optický rezonátor [25].....	12
Obr. 7 Schéma Nd:YAG laseru [9]	14
Obr. 8 Schéma CO ₂ laseru [37].....	15
Obr. 9 Schéma vláknového laseru [21]	15
Obr. 10 Princip laserového svařování [31]	16
Obr. 11 Vznik „klíčové dírky,“ [22]	16
Obr. 12 Schéma svařování na dálku [36].....	17
Obr. 13 Jedno – zrcadlový snímač [34]	18
Obr. 14 Dvou – zrcadlový snímač [34].....	18
Obr. 15 Schéma Hybridního laser – obloukového svařování [11]	19
Obr. 16 Rozdíly svařovacích metod [10].....	19
Obr. 17 Hlava pro hybridní laser – obloukové svařování od firmy Fronius [15]	20
Obr. 18 Řez svarem po hybridním laser – obloukovém svařování [10].....	20
Obr. 19 Materiály karosérie auta Volvo XC60 [26].....	21
Obr. 20 Svařovací pracoviště	21
Obr. 21 Dveře automobilu svařované laserem [33]	22
Obr. 22 Mechanická rychloupínka [16].....	23
Obr. 23 Svařovací přípravek [4].....	23
Obr. 24 Virtuální model svařovacího pracoviště v programu RobotStudio [7].....	24
Obr. 25 Leptání plošné a na hranice zrn [27].....	26
Obr. 26 Pohled na svar shora	27
Obr. 27 Přiblížený pohled na svar shora	28
Obr. 28 Pohled na kořen svaru	28
Obr. 29 Pohled na svar po metalografickém výbrusu	29
Obr. 30 Pohled na svarový kov	29
Obr. 31 Přechod mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí	30
Obr. 32 Svarový kov v přechodu mezi plechy	30
Obr. 33 Pohled na horní část svaru.....	31
Obr. 34 Přechod mezi základním materiálem a vrstvou zinku	31

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli S460NL[6]..... 27

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technologický postup WPS

Specifikace postupu svařování „WPS“							
1. Výrobce: VUT BRNO, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ Technická 2896/2 616 69 Brno				10. Zkušební organizace:			
2. Místo: Brno				11. Způsob přípravy úkosu: -----			
3. Číslo dokladu (WPS) : 001/BP/FSI/PALETA				12. Způsob čištění: Odmaštění			
4. Číslo WPQR: -----				13. Specifikace základních materiálů - materiál 1: S460NL (1.8903) ČSN EN 10 025-3 - materiál 2: S460NL (1.8903) ČSN EN 10 025-3			
5. Číslo zkušebního kusu: 1							
6. Kvalifikace svářeče: ISO 9606-1 135 PBWFM1 St30PAssnb							
7. Metoda svařování: 52 LBW				14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 1,6			
8. Druh svaru: Přeplátovaný spoj				15. Vnější průměr [mm]: D = -----			
9. Údaje o přípravě svarových ploch: ČSN EN ISO 9692-1				16. Poloha svařování: -----			
17. Tvar spoje		18. Rozměry		19. Postup svařování			
		a [mm]					
		1,6					
20. Parametry pro svařování							
21. Svarová housenka	1	2	3	4	5	6	
22. Metoda svařování	52 LBW						
23. Průměr přídav.mater. [mm] - Ø	/						
24. Svařovací proud [A]	/						
25. Svařovací napětí [V]	/						
26. Svařovací výkon [kW]	1÷10						
27. Přenos kovu přídavného materiálu	/						
28. Rychlost podáv.drátu [m.min ⁻¹]	/						
29. Svařovací rychlost paprsku [m.min ⁻¹]	6÷60						
30. Tepelný příkon [kJ/mm]	/						
31. Přídavný materiál - zařazení a značka: -----							
32. Předpis pro sušení: -----				42. Údaje o podložním kroužku: -----			
33. Ochranný plyn / tavidlo: ----- - ochranný plyn [l.min. ⁻¹]: ----- - ochrana kořene [l.min. ⁻¹]: -----				43. Další informace: Rozkvyv - amplituda: - frekvence a doba prodlevy: Rozkvyv (max. šířka housenky):			
34. Wolfram. elektroda, druh/průměr: -----				44. Údaje pro pulzní svařování: -----			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene: -----				45. Údaje pro plazmové svařování: -----			
36. Teplota předehřevu [°C] : -----				46. Úhel nastavení hořáku: -----			
37. Interpass teplota [°C] : -----				47. Druh automatu a svař. hlavy: -----			
38. Tepelné zpracování / stárnutí: -----				48. Prokování svaru: -----			
39. Doba, teplota, postup: -----				49. Poznámky: -----			
40. Rychlost ohřevu a chladnutí: -----							
41. Svařovací (pracovní) vzdálenost [mm]: přibližně 525							
50. Vypracoval: Petr Paleta				52. Schválil: Ing. Jaroslav Kubíček			
51. Datum: 17.5.2016				53. Datum: 23.5.2016			