



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ÚPRAVA LASEROVÉHO SVAŘOVACÍHO PRACOVISTĚ PRO SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ UVOLŇUJÍCÍ NADMĚRNÉ MNOŽSTVÍ ZPLODIN

MODIFICATION OF A LASER WELDING SYSTEM FOR WELDING MATERIALS RELEASING EXCESSIVE AMOUNTS OF FUMES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Kohout

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jaroslav Kohout**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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

Úprava laserového svařovacího pracoviště pro svařování materiálů uvolňující nadměrné množství zplodin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh zkapacitnění odsávacího systému pro laserové svařovací pracoviště umožňujícího svařovat i materiály uvolňující nadměrné množství dýmů a zplodiny. Požadavkem je zachování neporušenosti proudění ochranné atmosféry Ar chránící svarovou lázeň před oxidací.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování s důrazem na problematiku ochrany svarové lázně před oxidací. Osvojit si problematiku vyhodnocování svarových vad.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KOHOUT Jaroslav: Úprava laserového svařovacího pracoviště pro svařování materiálů uvolňující nadměrné množství zplodin

Práce řeší realizace odsávacího systému pro laserové svařování. Konkrétním výrobkem je rošt užívaný pro venkovní odvodnění. Původní technologie výroby MAG má být nahrazena laserem. Při svařování oceli S235JR byl pozorován výrazný vývin zplodin, které následně znemožňují vlastní proces. Byly provedeny praktické experimenty a pomocí tahové zkoušky a metalografických výbrusů svarů vyhodnoceny. Na základě zjištěných výsledků byla doporučena optimální poloha odsávací hubice a parametry svařování. Zjištěné hodnoty byly znovu ověřeny experimentem. Dále bylo navrženo vhodné odsávací zařízení a provedeno ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova: laser, svařování laserem, odsávání zplodin, dým

ABSTRACT

KOHOUT Jaroslav: Modification of a laser welding system for welding materials releasing excessive amounts of fumes

The thesis deals with the implementation of a suction system for laser welding. The specific product is grate used for outdoor drainage. The original GMAW production technology is to be replaced by a laser. During the welding of S235JR steel, a significant development of exhaust gases was observed, which subsequently made the actual process impossible. Practical experiments were performed and evaluated using tensile testing and metallographic cut. Based on the results, the optimal position of the suction nozzle and welding parameters were recommended. The obtained values were re-verified by experiment. Furthermore, a suitable extraction device was proposed and an economic evaluation was performed.

Keywords: laser, laser welding, fumes extraction, smoke

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOHOUT, Jaroslav. *Úprava laserového svařovacího pracoviště pro svařování materiálů uvolňující nadměrné množství zplodin* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132382>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Oudoleni dne 21.5.2021

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za vstřícný přístup a cenné rady a připomínky týkající se zpracování diplomové práce a panu Ing. Kamilovi Podanému, PhD. za provedení mechanických zkoušek. Dále bych rád poděkoval společnosti ACO Industries k.s. za umožnění pokusů a jejím zaměstnancům za pomoc při řešení práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Varianty řešení.....	11
2 ROZDĚLENÍ LASERŮ.....	13
2.1 Polovodičové lasery.....	14
2.2 Plynové lasery.....	15
2.3 Pevnolátkové lasery.....	16
2.2.1 Tyčové lasery (Nd:YAG).....	17
2.2.2 Diskové lasery.....	18
2.2.3 Vláknové lasery.....	18
3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM.....	20
2.1 Interakce svazku se základním materiálem.....	21
2.2 Kondukční režim svařování.....	22
2.3 Penetrační režim svařování.....	22
2.4 Svařovací parametry.....	23
2.5 Ochranné plyny.....	23
4 SVAROVÉ VADY.....	26
5 TESTOVÁNÍ SVARŮ.....	28
5.1 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje.....	28
5.2 Destruktivní zkoušky svarových spojů.....	30
6 STUDIUM PROUDĚNÍ A CHEMICKÉHO SLOŽENÍ.....	34
6.1 Studium proudění.....	34
6.1.1 Šířivá metoda.....	34
6.1.2 Metoda nitřových sond.....	35
6.2 Analýza chemického složení povrchu.....	35
6.2.1 Spektrometrie laserem buzeného plazmatu (LIBS).....	36
6.2.2 Energiově-Disperzní mikroanalýza (EDX).....	36
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
6.1 Charakteristika svařovaného materiálu.....	38
6.2 Experiment I.....	39
6.2.1 Tahová zkouška I.....	43
6.2.2 Vyhodnocení makrostruktury I.....	45
6.3 Experiment II.....	49
6.3.1 Tahová zkouška II.....	50
6.3.2 Makrostruktura II.....	51
6.3.3 Analýza povrchu EDX.....	53
6.4 Vyhodnocení svarových spojů podle metodiky ACO.....	54
6.5 Vlastní návrh odsávání.....	55
6.6 Technicko ekonomické zhodnocení.....	57
7 ZÁVĚRY.....	58
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

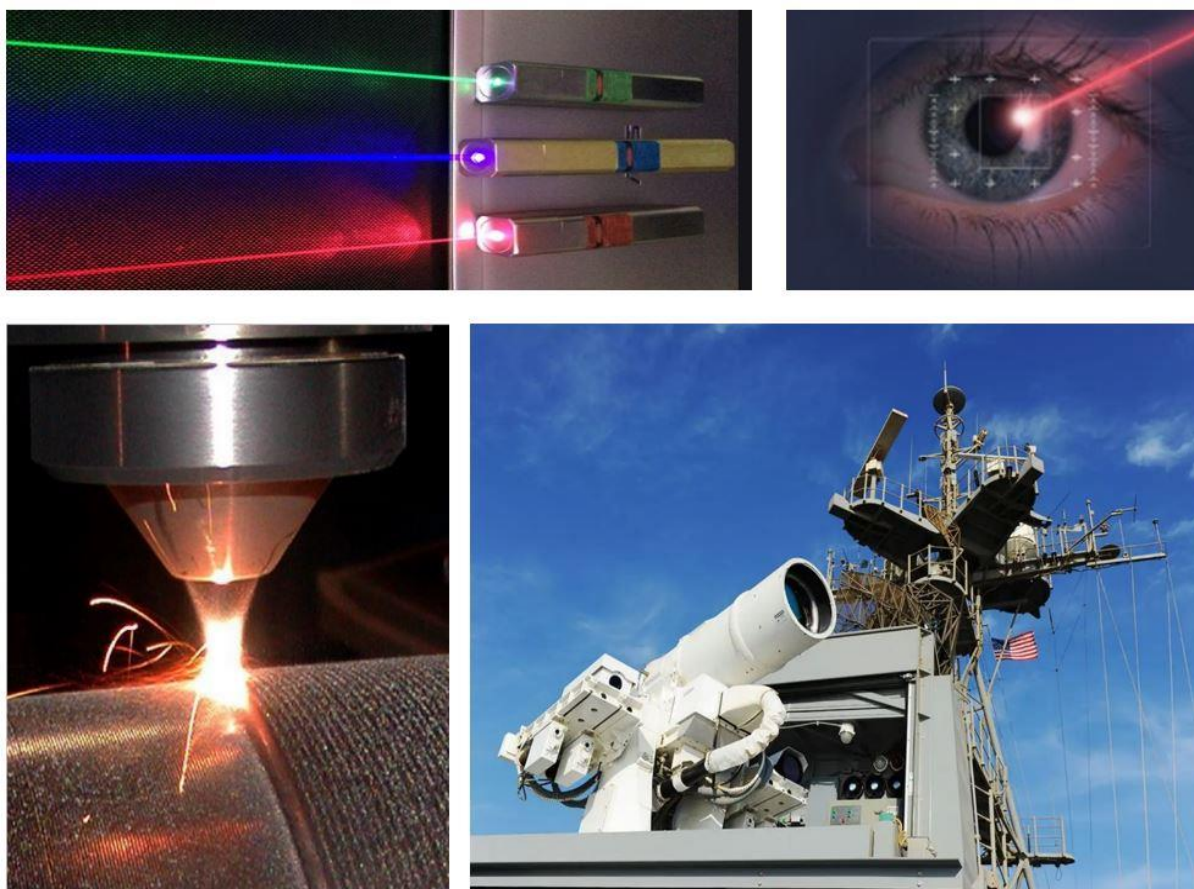
ÚVOD [3,4,5,6,7]

Moderní doba klade čím dál tím vyšší požadavky na kvalitu výrobků ve všech odvětvích lidské činnosti. Požadována přesnost a nároky na cenu produktů posupně vyřazují konvenční zařízení a doposud používané metody. Díky tomu dochází k vývoji a modernizaci výrobních postupů. Jednou z progresivních metod umožňujících dodržet požadovaná kritéria je technologie laseru.

Dalšími moderními trendy jsou automatizace a digitalizace. Tyto tendence rovněž dobře nahrávají použitelnosti laseru. Fyzikální princip fungování je sice pro řadu běžných smrtelníků nadmíru složitý, moderní software a zpracování uživatelských rozhraní pomocí výpočetní techniky ale čím dál tím lépe umožňují ovládat jinak složité procesy. Použitelnost i komplexních technologií, jako je právě zmíněný laser se díky tomu velmi rychle zvyšuje. S lasery se běžně můžeme setkat například v medicínských oborech či ve spotřební elektronice, své uplatnění mají také ve vojenství.

V průmyslové praxi má v dnešní době laser nezastupitelné místo v dělení materiálu, vrtání, kalení, gravírování, navařování a svařování. Díky tomu technologie laseru v posledních letech nahradila mnoho konvenčních strojů. Průmyslové podniky proto v rámci modernizace a zvýšení ekonomičnosti výroby pořizují laserová zařízení.

Jako každá technologie i laser má svá specifika. Pochopení problematiky od počátečního principu je nutným předpokladem pro vhodné použití metody.



Obr. 1 Ukázky praktických použití laseru [3,4,6,7]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [8,9]

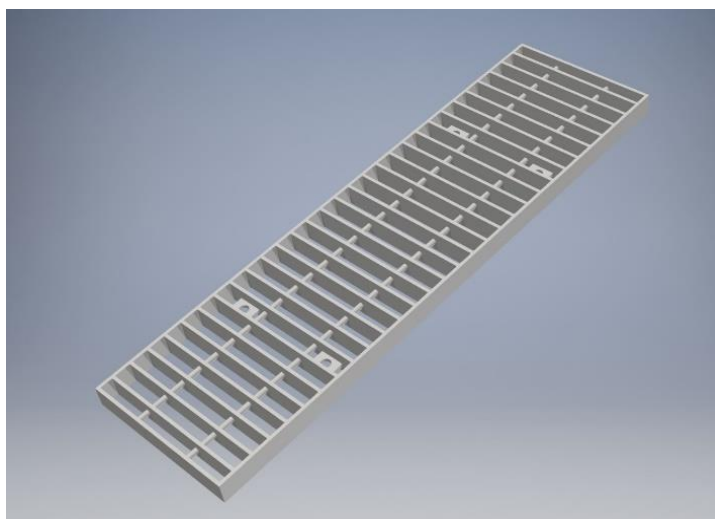
Návrh zkapacitnění odsávacího zařízení pro laserové svařovací pracoviště vychází z požadavku výroby roštů novým, automatizovaným způsobem bez bezprostřední přítomnosti obsluhy. Automatizace procesu by měla vést ke snížení časového nákladu na svařování výrobku a omezení faktoru lidských chyb při jeho výrobě.

Konkrétním výrobkem je příčkový rošt o rozměrech 909 mm x 254 mm a hmotnosti 12,5 kg, viz obr. 2. Materiálem je ocel S235JR. Rošt se používá do žlabů pro systém venkovního odvodnění. Finální výrobní operací je proces zinkování. Výchozí polotovary jsou vyráběny technologií laserového řezání z plechu požadované tloušťky.

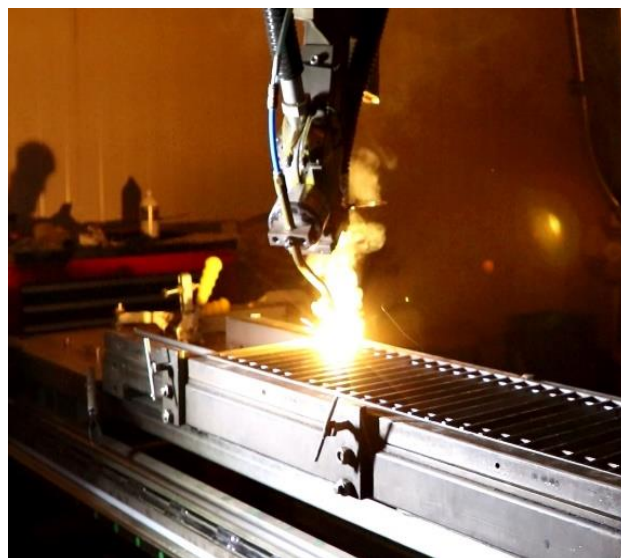
Stávající proces výroby roštu probíhá svařováním konstrukce poskládané z příček, založené v přípravku. Svařování je realizováno technologií MAG v ručním režimu. Proces odsávání vytvořených zplodin a zajištění vhodných pracovních podmínek je řešen lokálním odsáváním a osobními ochrannými pomůckami svářeče. To způsobuje značně nekomfortní pracovní podmínky a zátěž pracovníka. Celkový časový náklad na svařování činí cca 110 min.

Požadovaný proces automatizace má být realizován pomocí úpravy stávajícího zařízení v podobě samostatného laserového svařovacího pracoviště. Firma disponuje pracovní buňkou osazenou robotem KUKA KR 30-60 s nesenou laserovou svařovací hlavou. Pracovní prostor je vybavený základním odsávacím systémem, jeho konstrukce bohužel neumožňuje jednoduché zapracování do myšleného procesu.

Z důvodu automatizace již byl vytvořen přípravek na zakládání polotovarů roštu. Konkrétní proces svařování použitého materiálu je doprovázen výrazným vývinem zplodin, jak je možné vidět na obr. 3. Ty představují bezpečnostní riziko pro obsluhu, vyvinutý kouř způsobuje sníženou viditelnost v prostředí a rovněž zamořuje dýchatelnou atmosféru. Kromě vlivu na bezpečnost práce má dále přímý vliv na životnost poměrně nákladného strojního vybavení, snaha o minimalizaci účinků zplodin je opodstatněná. Odsávací systém by měl být navržený tak, aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění ochranné atmosféry a tím ke vzniku svarových vad při kontaktu svarové lázně se vzdušným kyslíkem.



Obr. 2 Model vyráběného roštu



Obr. 3 Vývin zplodin při svařování

1.1 Varianty řešení [8,9,11]

- Jako první možnost se nabízí odsávání celého prostoru robotizovaného pracoviště. Odtah zplodin zajistit do centrálního odsávacího systému, případně lokálním zařízením s vlastním odtahovým systémem. Tato varianta nepokrývá zamezení vlivu

kouřových částic na zařízení uvnitř buňky, druhým záporem je skutečnost, že konkrétní výroba probíhá tak, že zatímco robot svařuje jeden rošt, v mezičase lidská obsluha stroje zakládá polotovary roštu do paralelně umístěného přípravku. Jak je vidět na obr. 4, s tím rozdílem, že při skutečné výrobě nestojí pracovník v prostoru robota, ale za stěnou, respektive otočným portálem, který právě umožňuje souběžné svařování jednoho výrobku a



Obr. 4 Rozmístění svařovacího pracoviště [9]

zakládání polotovarů pro druhý. Z mechanického fungování otočného portálu vyplývá, že prostor buňky není v době otáčení izolovaný od zbytku dílny a případné zplodiny mohou proniknout ven. Celkové odsávání by tedy muselo mít tak vysoký výkon, aby stihlo odsát kouř vzniklý svařováním před otočením portálu. To se jeví jako prakticky nerealizovatelné.

- Další možností je použití lokálního odsávání zplodin. Výhoda metody spočívá v možnosti okamžitého odsátí zplodin, které se tak nedostanou do kontaktu jak se strojním zařízením, tak s případnou obsluhou. Odsávací hubice musí být v závislosti na umístění vůči svařovanému materiálu odolná působení vysokých teplot. Lokální umístění také požaduje pohyblivost odsávacího systému, minimálně tedy hubice. Robot umožňuje polohování laserové svařovací hlavy do požadované pozice a přídatným zařízením nesmí být tato skutečnost omezena. Ilustrativní tip odsavače je na obr. 5. Umístění odsávání na zakládací přípravek je rovněž komplikované, protože ten je součástí již zmíněného otočného portálu. Další nevýhodou lokálního odsávání je reálná možnost ovlivnění samotného procesu svařování tím, že dojde k odsátí ochranného svařovacího plynu. Takový jev je samozřejmě nežádoucí, neboť by způsobil nekvalitní svar.



Obr. 5 Možný design odsavače [11]

- třetí varianta vychází z myšlenky odstranit příčinu tvorby zplodin ještě před jejím vznikem. Postup by spočíval v předúpravě svařovaných polotovarů očištěním dosedacích svarových ploch. Čištění ploch je možné chemicky - použitím vhodného odmašťovadla, nebo mechanicky - obroušením. Obě dvě zmíněné operace by bylo nutné kvůli tvaru polotovaru provádět ručně, čímž by se značně zvýšila časová náročnost přípravy.
- poslední navrhanou možností je pořízení specializovaného odsávacího systému. Problematikou dodatečných odsávacích zařízení se zabývá např. firma Abicor Binzel. Výrobce nabízí patentovaný design odsavače s vysokou variabilitou použití. Zařízení je vhodné i pro robotizovaná pracoviště. Princip systému spočívá v lokálním odsávání zplodin, konkrétní design záleží na zvoleném typu odsavače. Nabízený produkt je vidět na obr. 6. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena zařízení.



Obr. 6 Odsavač xFUME [12]

Z navržených postupů řešení problému se nabízí použití lokálního odsávání, konstrukčně navrženého vhodným způsobem tak, aby neovlivňovalo ochranu svarové lázně. Nejjednodušší řešení spočívá v nákupu nabízeného odsávacího zařízení zmíněného v poslední variantě. Z ekonomických důvodů a také jako podklad po vlastní diplomovou práci a ověření užitečných vlastností uvažovaných zařízení je volena možnost návrhu vlastního lokálního odsavače. Výchozím rozhodovacím parametrem pro případné pořízení odsávacího systému bude technicko - ekonomické zhodnocení.

2 ROZDĚLENÍ LASERŮ [7,13,14,15,16,17]

Laser je speciální zdroj světla (elektro-magnetických vln), který generuje svazek s malou rozbíhavostí. Vlnová délka vzniklého záření je závislá na druhu aktivního prostředí a je jednotná. Svazek má koherentní charakter, díky tomu je poměrně snadno fokusovatelný do ohniska o malém průměru. Aby bylo zmíněných vlastností dosaženo, skládá se laserové zařízení ze tří hlavních jednotek. Těmi jsou aktivní prostředí, budicí systém a optický rezonátor. K vedlejším prvkům patří systém pro vedení svazku a chladicí zařízení.

- Aktivní prostředí - zde dochází ke stimulované emisi záření, jedná se o základní prvek laserového systému.
- Budicí (čerpací) systém - má za úkol dodávání energie aktivnímu prostředí, zajišťuje množství částic ve vyšší energetické hladině, tedy nabuzeném stavu, což je klíčovým předpokladem mechanismu stimulované emise.
- Optický rezonátor - z důvodu dosažení vyššího počtu stimulovaných reakcí oproti spontánním. Jedná se o dvě zrcadla umístěná proti sobě - polopropustné a nepropustné. Odrazy záření v aktivním prostředí působí jako podněty k další simulované emisi. Proces odrazu se opakuje a dochází k nárůstu intenzity svazku. Polopropustným zrcadlem následně svazek o dostatečné intenzitě vystupuje ven.
- Vedení svazku - vystupující svazek je dále upravován v systému čoček a clon, tím dochází ke zvýšení kvality a úpravě průměru výstupního svazku. Další soustava čoček a zrcadel slouží k vedení do vlastní pracovní hlavy laseru, nebo do optického vlákna, které teprve dopraví svazek do místa dalšího zpracování.
- Chladicí zařízení - proces je doprovázen vývinem tepla, z důvodu jeho eliminaci a pro ochranu před přehřátím slouží chlazení.

Na základě toho, o jaké se jedná aktivní prostředí, jaké buzení ve svém principu využívá a jaký je provozní režim se dělí lasery do několika skupin, viz tab. 1.

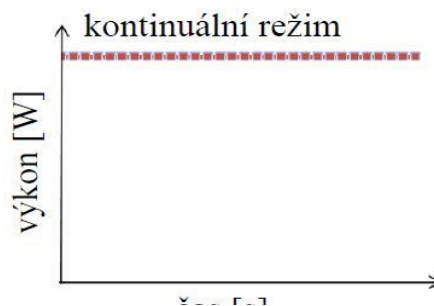
Tab. 1 Rozdělení laserů [7]

Aktivní prostředí	Způsob buzení	Tvar aktivního prostředí	Provozní režim
plyn kapalina pevná látka	optické el. proudem chemické	válcové deskové diskové vláknové	kontinuální pulzní

V průmyslové praxi se v současnosti pro svařování běžně používají CO₂ a Nd:YAG lasery, postupně však ustupují diskovým, diodovým a především vláknovým typům z důvodu vyšší účinnosti, nižších provozních nákladů a jednodušší obsluhy.

Lasery pracují ve dvou režimech, kontinuálním a pulzním. Režimy svařování mají vliv na jakost svaru a efektivitu využití laserového zařízení.

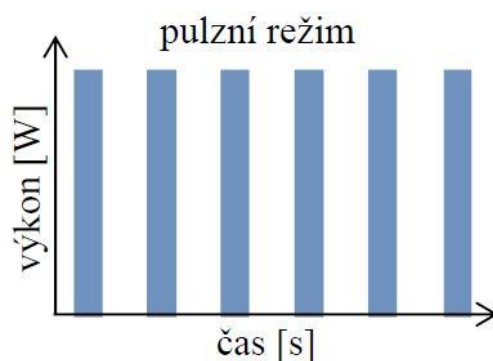
V kontinuálním režimu se okamžitá hodnota výstupní energie paprsku blíží její průměrné hodnotě, viz obr. 7, stabilizovaný svazek má neměnnou intenzitu a je vyzařován nepřetržitě. Ve



Obr. 7 Kontinuální režim svařování [17]

zdroji nedochází k výrazné akumulaci energie a následným výkyvům systému. Povaha záření a závislost výkonu na čase je lineární.

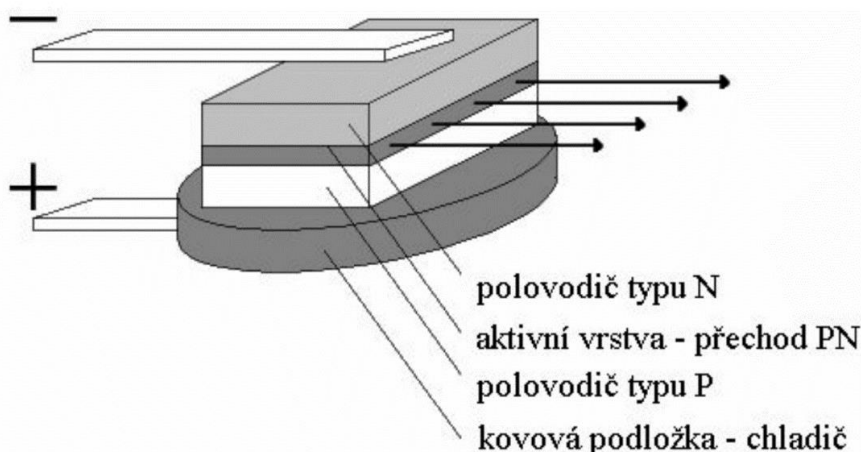
V pulzním režimu dochází k akumulování energie po delší dobu, paprsek má proto při svém výstupu vyšší okamžitou energii. Mezi jednotlivými výstupy paprsku jsou prodlevy, které jsou určeny časem nutným k nahromadění potřebné energie, ty se pohybují v řádech nanosekund až pikosekund. Výstup paprsku je tedy ve formě krátkých impulsů, jak je vidět na obr. 8.



Obr. 8 Pulzní režim svařování [17]

2.1 Polovodičové lasery [10,13,14,17,18,19]

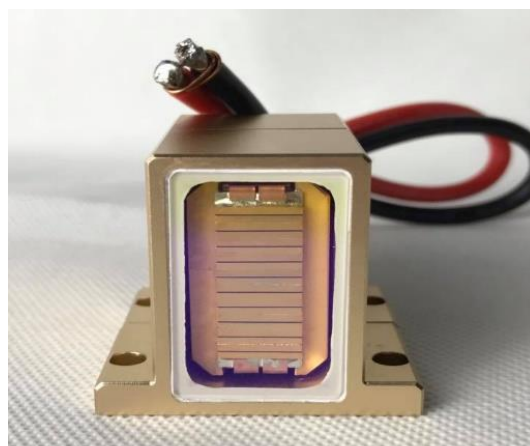
Název je systematicky odvozen od aktivního prostředí, které je tvořeno elektricky buzeným polovodičem s P-N přechodem, typicky se jedná o laserovou diodu. Do místa styku polovodičů je přiveden elektrický proud a dojde k emisi záření. To se dále šíří rovinou dotyku vrstev a dochází k jeho zesilování. Optický rezonátor je tvořený dvěma leštěnými čelními plochami, které jsou umístěné kolmo k P-N přechodu. Schéma laserové diody je znázorněno na obr. 9.



Obr. 9 Schéma polovodičové laserové diody [18]

Fyzikální princip se v porovnání s ostatními lasery liší, nedochází zde k přechodu elektronů mezi diskrétními hladinami, nýbrž k přechodu mezi valenčním a vodivostním pásmem polovodiče. Pro přechod přes „zakázaný pás“ je dodávána potřebná energie pomocí fotonů. Mezi přednostmi takto vznikajícího záření patří fakt, že velikost zakázaného pásma je 1 - 4 elektronvolty, což je ideální pro tvorbu infračerveného a viditelného světla.

Do skupiny polovodičových laserů patří lasery diodové. Záření není v jejich případě generováno laserovou diodou, ale přímo P-N přechodem. Základním stavebním prvkem je emitor velmi malých rozměrů, který generuje záření o výkonu v řádech jednotek wattů. Emitory jsou dále skládány do řad a následně stohů. Spojením několika stohů je dosahováno výkonu v řádech



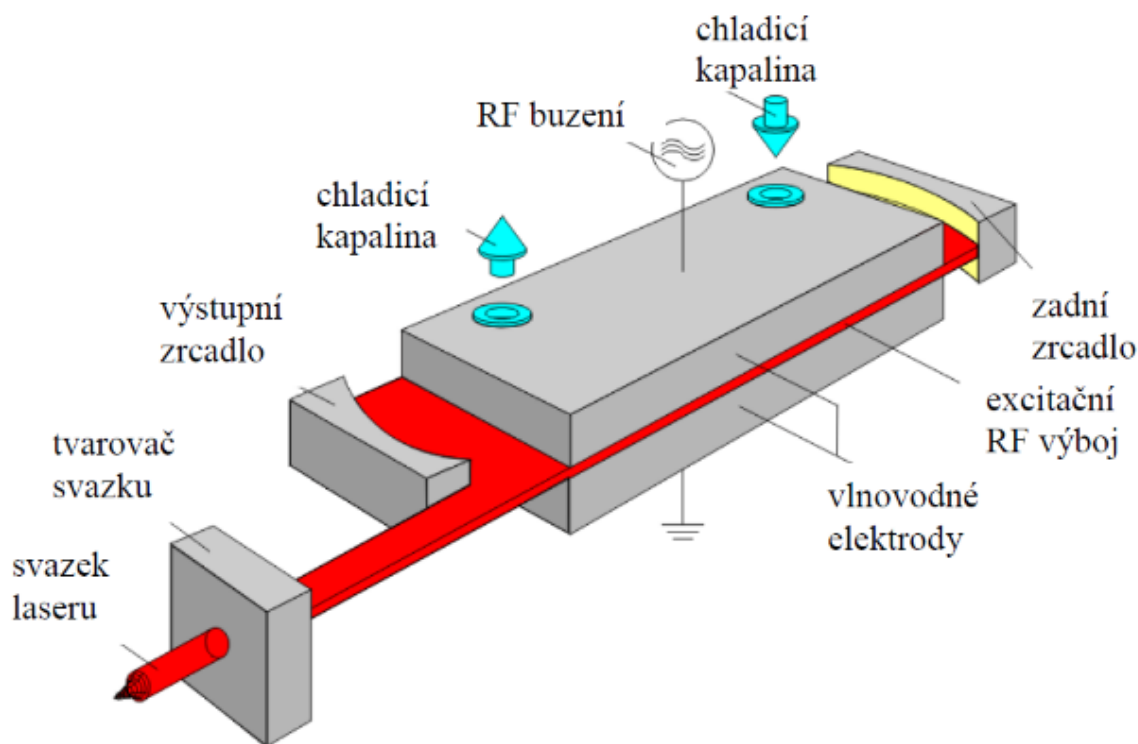
Obr. 10 Spojený stoh [19]

kW. Seskládaný a ucelený stoh je vidět na obr. 10. Vytvořený paprsek se fokusuje do větší plochy než u osatních laserů, proto své uplatnění nachází zejména při kalení nebo navařování.

2.2 Plynové lasery [10,13,14,17,19]

Aktivní prostředí tvoří směs plynů, případně plynů a par ve stavu jednotlivých atomů, nebo molekul použitých prvků. Používá se např. směs hélia a neonu, nebo oxidu uhličitého, dusíku a hélia. Výkon se pohybuje v řádech od několika miliwattů až po kilowatty. Zařízení se dají provozovat v kontinuálním i pulzním režimu. Stimulovaná emise je ve většině případů dosahována čerpáním plynu elektrickým výbojem, možné je také použití chemické reakce, nebo optického čerpání. Během provozu je aktivní prostředí ve stavu plazmy s vysokou koncentrací nabitých částic.

V průmyslové praxi se nejčastěji využívá aktivní plyn tvořený směsí plynného dusíku, hélia a oxidu uhličitého. Tato konfigurace je známá jako CO₂ laser. K buzení aktivního prostředí dochází buď elektrickým výbojem (DC), nebo radio-frekvenčně (RF). Na obr. 11 je znázorněn rezonátor využívající pro buzení aktivního plynu systém RF. Proces se odehrává mezi dvěma elektrodami, které díky své ploše umožňují chlazení plynu v rezonátoru. Výhodami zmíněného zařízení jsou dlouhá životnost, vysoká spolehlivost a nízké provozní náklady. Pro výkonové lasery (cca nad 10kW) se používá rezonátor s plynule proudícím plynem, lasery nižších výkonů mají rezonátor hermeticky uzavřený



Obr. 11 Rezonátor s RF buzením [10]

Co₂ lasery mohou pracovat v kontinuálním i pulzním režimu, účinnost se pohybuje v rozmezí 15 - 20 %. Výkon má široký rozsah (0,5-20kW), přičemž obecně do 0,5kW se používají CO₂ lasery pro značení materiálu a řezání nekovů. Zařízení se středním výkonem od 0,5 do 6kW se uplatňují především pro řezání plechů, nad 6kW zejména pro svařování.

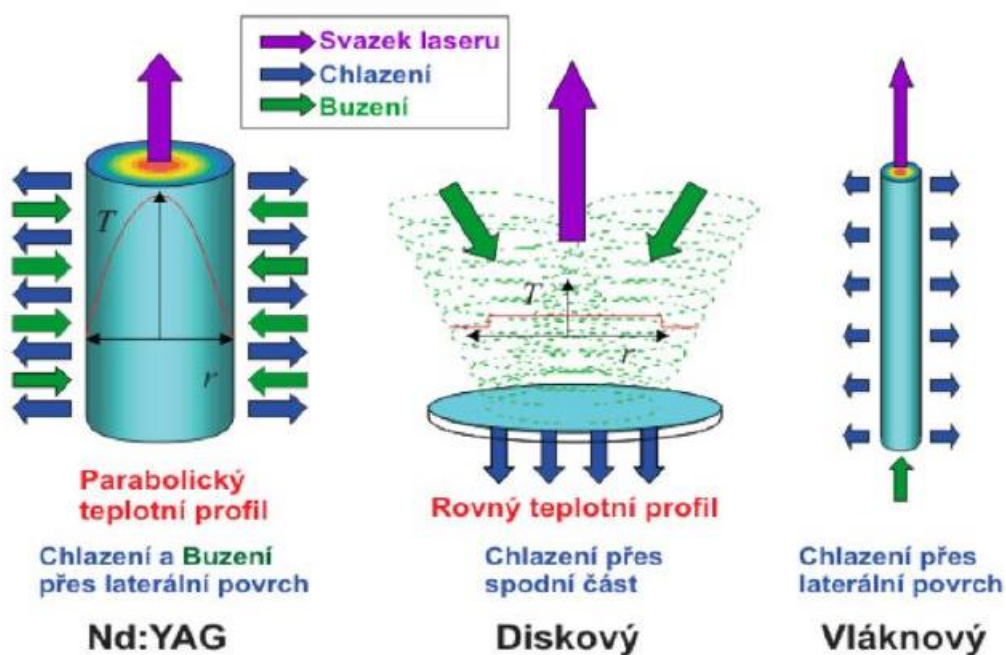
Značnou nevýhodou CO₂ laseru je vlnová délka emitovaného záření (10,6 μm), která neumožňuje vedení svazku optickým vláknem. K vedení se používá systém čoček a zrcadel,

zařízení se z toho důvodu stává rozměrné a nemobilní. Zvýšené nároky jsou kladeny na přívod chladicího média a na údržbu. Za zmínku stojí používané optické čočky, které se v případě rozbití stávají životu nebezpečné z důvodu toxicity.

2.3 Pevnolátkové lasery [13,14]

Aktivní prostředí tvoří dielektrikum, jedná se o monokrystal, nebo amorfni látku s přídavnými aktivačními prvky. Aktivátory, jak se prvky nazývají, jsou ze skupiny kovů (Ni, Cr, Co), nebo lanthanoidů (Nd, Gd, Yb). Všechny typy pevnolátkových prostředí jsou účinné luminofory neboli látky schopné absorbovat energii a následně ji vyloučit ve formě světla. Základním elementem je matrice, od které jsou odvozeny fyzikální a chemické vlastnosti. Na matrici jsou kladeny vysoké nároky na chemickou stabilitu, mechanickou pevnost a tepelnou odolnost. Nejčastěji používaným materiálem jsou krystaly YAG, CaF₂, nebo Al₂O₃, lze rovněž použít např. skla a keramiku.

Pevnolátkové lasery se dále dělí podle tvaru aktivního prostředí na tyčové, diskové a vláknové. Tvar prostředí blíže určuje účinnost laserového zdroje. Jednotlivé typy jsou ve zkratce představeny na obr. 12.

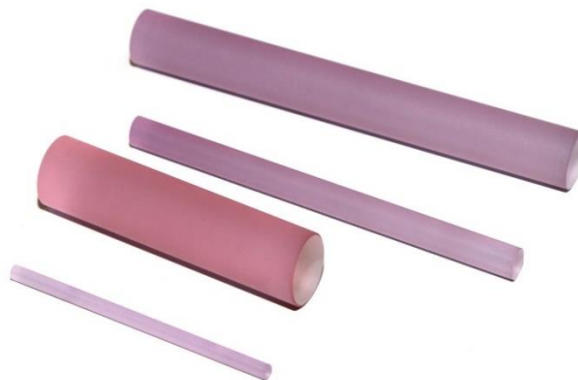


Obr. 12 Typy pevnolátkových laserů [14]

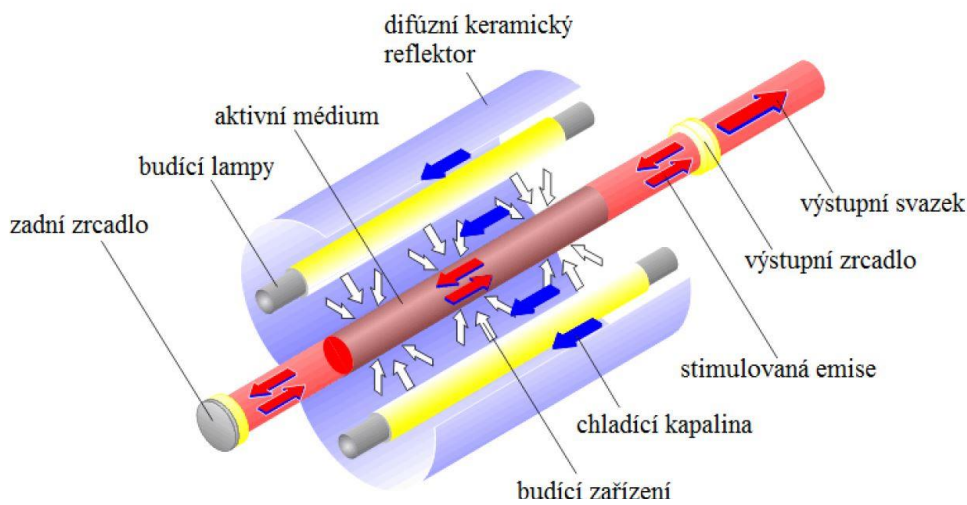
2.2.1 Tyčové lasery (Nd:YAG) [10,13,14,17]

Jedná se první generaci pevnolátkových laserů, název je odvozen od aktivního prostředí, jímž je monokrystal ytrium aluminium granátu dotovaný ionty neodymu, případně ytterbia. Tyče používané jako aktivní prostředí jsou na obr. 13. Vlnová délka svazku je 1,064 μm , výkon se pohybuje v řádech desítek wattů až 16 kW. Laser může pracovat v pulzním i kontinuálním režimu.

Hlavní výhodou skupiny Nd-YAG laserů je možnost použití optického vlákna pro vedení svazku díky vhodné vlnové délce. Toho se využívá především u svařovacích robotů z důvodu snížení hmotnosti nesenné na rameni zařízení. První generace laserů je buzena výbojkami, pracuje v kontinuálním i pulzním režimu. Výhodou je vysoká energie pulzu a nižší cena, nevýhodou je nízká účinnost přeměny energie a častá výměna výbojek. Velká část dodané energie dodané do výbojky se nevyužije a dojde k přeměně na teplo, z toho důvodu je nutné intenzivní chlazení systému. Výbojkový systém buzení je na obr. 14.

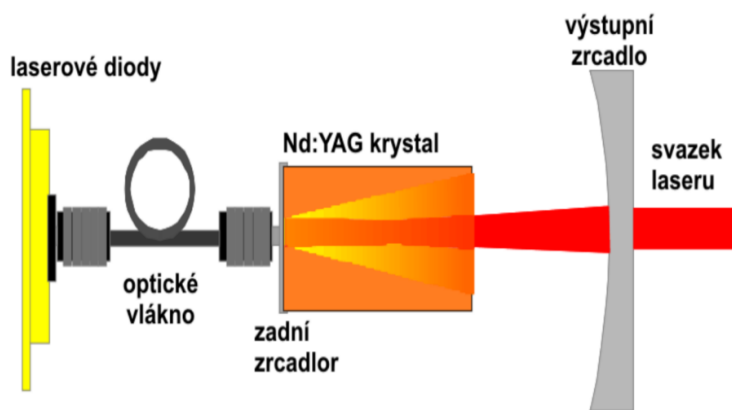


Obr. 13 Tyče aktivního prostředí [10]



Obr. 14 Výbojkový systém [20]

Druhá generace používá pro buzení polovodičové diody. Jejich výhodami jsou ve srovnání s výbojkovým typem vyšší účinnost a kvalita svazku a nižší provozní náklady. Díky diodám je zvýšena životnost a sníženy nároky na chlazení. K nevýhodám patří pořizovací cena vysoko výkonových polovodičových laserových diod. Tyto lasery se dále dělí podle uspořádání rezonátoru. Budící zdroj může být umístěn z boku, nebo vzadu. Výhodou



Obr. 15 Detail zadního čerpání [20]

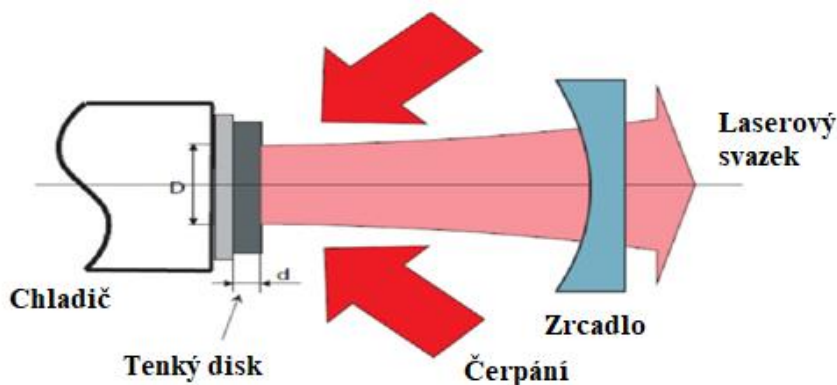
bočního (transversálního) uspořádání je možnost dosahovat vyššího výkonu, nevýhodou je nižší kvalita svazku. Schéma zadního uspořádání buzení lasu je na obr. 15.

Výhodou čerpání zezadu je možnost přivedení budícího záření optickým kabelem, diody potom mohou být umístěny mimo rezonátor. Laserový svazek v této konfiguraci dosahuje vyšší kvality. Boční čerpání oproti tomu poskytuje možnost dosáhnout vyššího výkonu.

Diodové pevnolátkové lasery jsou využívány především v pulsním režimu (zde tzv. Q-spínaný pulsní režim), při kterém je laserem generováno množství velmi krátkých pulsů (řádově nanosekundy) s výkonem do 100 W. Časté uplatnění je pro gravírování a značení kovů, plastů i jiných materiálů. Ve srovnání s dalšími typy laserů mají nižší účinnost, jsou jimi proto postupně nahrazovány.

2.2.2 Diskové lasery [10,13,14,17]

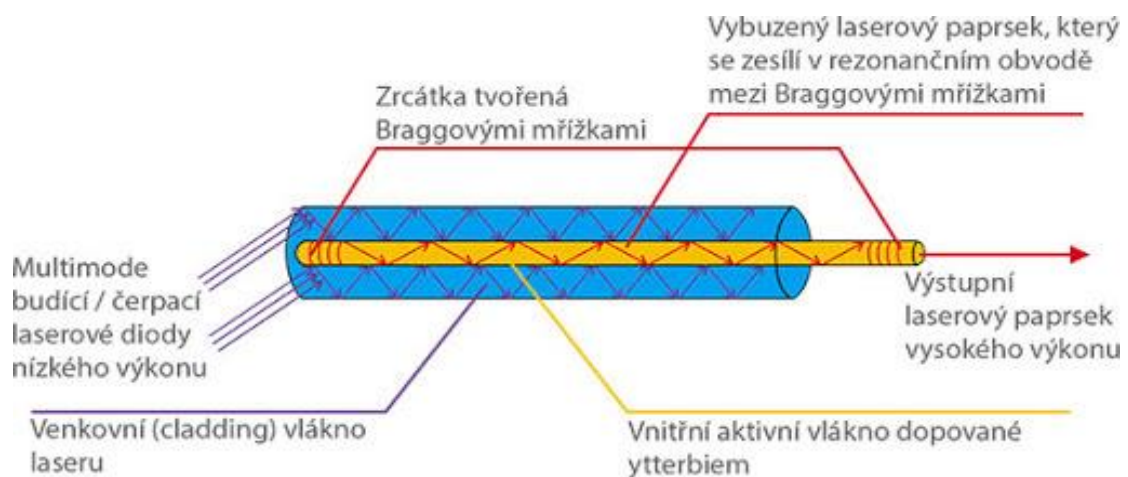
Další generací původního Nd:YAG systému je diskový laser, jehož aktivní prostředí má tvar tenkého disku. Krystal je vybroušen tloušťky přibližně 0,25 mm při průměru kolem 100 mm. Aktivní prostředí je často dotováno jiným typem ytterbia, označuje se Yb:YAG. Buzení je prováděno speciálním zařízením umožňujícím vícenásobné dopady záření, které je přiváděno optickým vláknem. Následná absorpce probíhá v celé tloušťce aktivního prostředí, čímž je dosaženo velmi vysoké účinnosti. Hlavní výhodou je, že díky konstrukci je teplota v aktivním prostředí rovnoměrně rozložena a je možné ji efektivně regulovat. Díky tomu dosahuje výstupní paprsek velmi vysoké kvality i při vysokých výkonech. Laserový paprsek dosahuje vysoké kvality. Diskový typ se používá v oblasti náročnějších výkonových aplikací např. pro svařování a řezání. Zjednodušený princip diskového laseru představuje obr. 16.



Obr. 16 Diskový laser

2.2.3 Vláknové lasery [10,14,16]

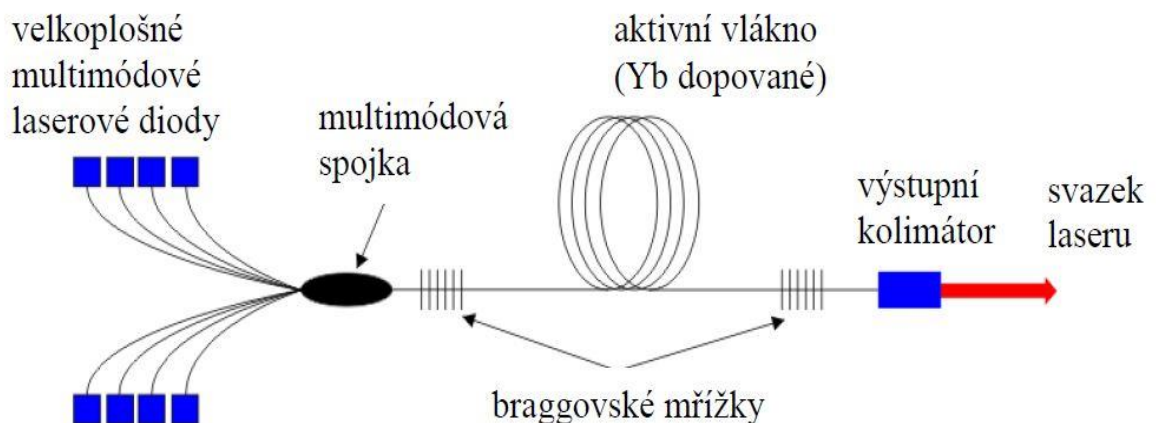
Technologicky nejmodernější představitel pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno křemíkovým vláknem dlouhým v řádu metrů. Dopování je provedeno přimísením malých částic pomocných prvků do jádra, používá se ytterbium (Yb), případně erbium (Er), neodym (Nd), nebo thulium (Tm). Vláknem je díky konstrukci možné efektivněji chladit, proces je výrazně tepelně stabilnější, což má příznivý vliv na vedení paprsku. V současné době se používá dvouplášťová konstrukce optického vlákna, struktura uspořádání je na obr. 17.



Obr. 17 Vláknový laser [14]

Pro buzení se používají laserové diody, jejichž záření prochází přes venkovní plášť, který následně budí vnitřní optické vlákno nízkou - výkonovým laserovým zářením. Vnitřní vlákno dopované jedním ze zmíněných prvků dává vzniknout laserovému paprsku. Vnější vlákno má poměrně velký průřez díky tomu je schopné zvládat vysoký optický výkon. Dopované jádro má proti němu vyšší index lomu, díky tomu přivedená energie opakovaně prochází skrze jádro a budí další ionty.

Na rozdíl od jiných typů laserů netvoří optický rezonátor dvě rovnoběžná zrcadla, ale speciální struktury na optickém vlákne tzv. Braggovské mřížky. Jedná se o speciální úpravu jádra optického vlákna. Vytváří se UV laserem změnou struktury vlákna na tzv. zrcátka, která následně odrážejí vzniklé záření pouze specifické vlnové délky a fungují tak jako rezonátor. Schéma vláknového laseru je na obr. 18. Podstatnou výhodou vláknového laseru je možnost propojení čerpacích diod vlákny, která jsou následně sloučena v celek.



Obr. 18 Schéma vláknového laseru [10]

Laser může pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Výhody jsou vysoká účinnost (30 až 35%), kvalitní výstupní svazek, efektivní systém chlazení, kompaktní robustní konstrukce a nízké provozní náklady. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.

3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM [10,13,17]

Pod pojmem svařování kovů se rozumí vytvoření nerozebíratelného metalurgického spojení. Ke spojení dojde po aktivaci daných kontaktních ploch aktivační energií, tj. energií, kterou je potřeba dodat povrchovým atomům pro překonání vazebných sil v krystalové mřížce. Aktivační energii je možné dodat ve formě termické a radiační aktivity (fotonové/elektronové/iontové záření) u tavného svařování, nebo mechanické aktivity (pružná a plastická deformace) u tlakového svařování, případně kombinace mechanické a termické aktivity. Spoj je následně uskutečněn meziatomovými vazbami mezi jednotlivými svařovanými díly, či prostřednictvím přídavného materiálu.

Svařování laserem se řadí mezi metody tavné, prostředkem přenosu energie jsou zde fotony vybuzené v aktivním prostředí laseru. Svary provedené laserem se obecně vyznačují vysokou jakostí, technologie umožňuje svařovat materiály, které se konvenčními metodami svařují obtížně, nebo se vůbec svařit nedají. Samotný proces tvorby svarového spoje je netriviální záležitostí, z důvodu komplexních fyzikálních pochodů a vlivu chemických a metalurgických vlastností svařovaných materiálů. Obecná snaha v celém průmyslovém odvětví je automatizace. Proces laserového svařování je k této tendenci vhodným kandidátem. Používají se manipulátory, roboty a automatické přidržovače či zakladače polotovarů. Díky přesným polohovacím schopnostem robotů je umožněn vznik rovnoměrných kontinuálních spojů. Nevýhodou automatických procesů je nutnost přesnějších polotovarů a přípravků, krátký výčet předností a nevýhod je uveden níže:

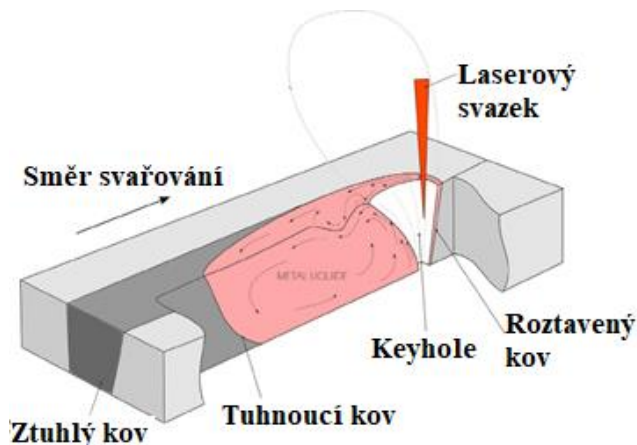
Výhody:

- Bez/s přídavným materiálem
- Vysoké svařovací rychlosti
- Vysoká přesnost
- Štíhlost svarů
- Heterogenní svary
- Průvarové svary

Nevýhody:

- Cena zařízení
- Přípravkování
- Nároky na přesnost
- Vysoká ochlazovací rychlost
- Bezpečnost práce

Fokusací svazku fotonů dochází k jejich nasměrování do malé plochy. Hlavní princip je vnášení energie do základního materiálu. V případě, že je přívod vyšší než odvod, dochází k nárůstu teploty. V případě laserového svařování se jedná o hodnoty hustoty vnesené energie řádově $10^6 - 10^9 \text{ W.cm}^{-2}$. Nárůst teploty je v takovém případě extrémní, svařování je charakteristické vysokou rychlostí ohřevu. Díky malé fokusované ploše zároveň dochází k nízkému vnášení tepla, což má za následek vnik menší tepelně ovlivněné oblasti, nižší hodnoty vnitřních pnutí a deformací. Proces je charakteristický zároveň také velmi vysokou rychlostí ochlazování. Ta má naopak negativní dopad při svařování materiálů, u kterých hrozí vznik křehkých struktur. Schéma laserového svařování je na obr. 19. Porovnání parametrů laserového svařování s ostatními metodami zobrazuje tabulka 2.



Obr. 19 Laserové svařování

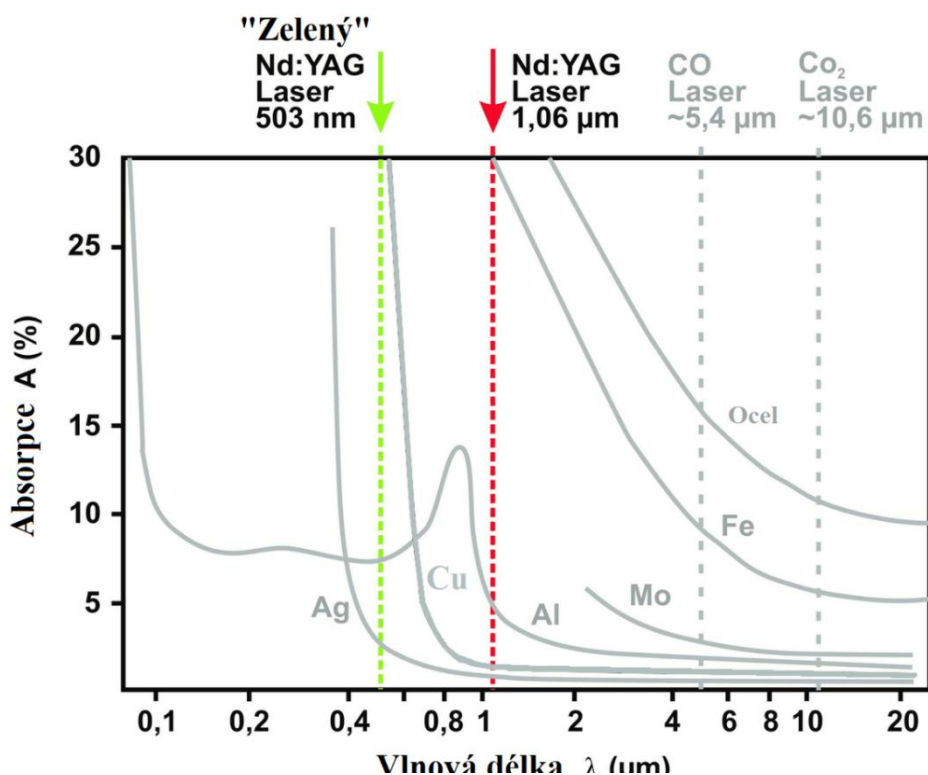
Tab. 2 Srovnání metod svařování [10]

Metoda	Hustota energie [W·cm ⁻²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [m·min ⁻¹]
Laser	10 ⁷ -10 ⁹	25	0,1-0,5	až 10
Plamen	10 ³	3	3	0,01
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5-3
Plasma	10 ⁶	až 12	1	0,5-5
El. paprsek	10 ⁸	200	0,03	0,5-5

2.1 Interakce svazku se základním materiálem [10,13,17,21]

Při kontaktu laserového svazku se základním materiálem dochází k několika pochodům. Fotony laserového paprsku nereagují přímo s povrchem kovu, ale s valenčními elektrony atomů povrchové vrstvy. Kontaktem může docházet ke třem různým interakcím. Fotony se buď odrazí, prochází, nebo jsou mřížkou absorbovány. Absorpcí fotonů dochází k nárůstu energie, což se projeví zvyšováním teploty. Hodnota energie vstřebané tímto mechanismem je závislá na vlastnostech ozařovaného materiálu a vlnové délce záření. Parametr popisující dané chování se nazývá absorpce materiálu neboli schopnost přijímat dopadající záření. Závislost absorpce na vlnové délce a materiálu ukazuje obr. 20.

Absorpci je možné ovlivnit stavem a teplotou povrchu. Překročením kritické hodnoty



Obr. 20 Závislost absorpce na vlnové délce [21]

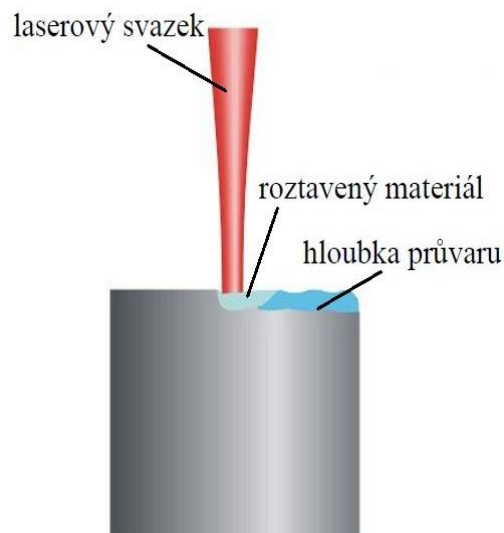
intenzity záření hodnota absorpce náhle vzroste, což je důsledkem zvýšení teploty materiálu, která zpětně zvyšuje absorpci. Absorpce je dále ovlivněna odrazivostí materiálu a úhlem

dopadu paprsku na povrch. Odrazivost povrchu lze snížit jeho zdrsněním, nanesením látky s vyšší mírou absorpce, případně povrchovou úpravou jako je např. moření.

2.2 Kondukční režim svařování [10,17,22,23]

Z hlediska interakce mezi svařovaným materiálem a paprskem lze svazek používat ve dvou pracovních režimech: kondukčním (nízkovýkonový) a penetračním (vysokovýkonový).

V kondukčním režimu se intenzita energie pohybuje do 10^6 W.cm^{-2} . Při této intenzitě dochází pouze k povrchovému natavování materiálu a pouze malému odpařování. Vnášené teplo je vlivem kondukce odváděno do objemu materiálu, teplota tavné lázně je blízko teploty tavení, dochází k minimální tvorbě par. Samotný proces vzniku svarového spoje je možné jednoduše popsat tak, že laserový svazek dopadá na povrch materiálu, dochází část záření je absorbována a část odražena. Absorbovaná energie způsobuje nárůst teploty, dochází k tvorbě taveniny. V závislosti na rychlosti přívodu další energie svazkem a odvodu tepla základním materiálem dochází ke zvětšování objemu svarového kovu. Povrchové napětí spolu s vysokým tepelným gradientem řídí tvar roztaveného kovu, poměr hloubky k šířce závaru a povrch výsledného svaru. V důsledku konvekce dále dochází k promíšení taveniny a tím k ovlivnění složení. Tímto mechanismem může dále docházet k vadám, jako jsou: neprůvary, póry, různé šířky přetavení. Princip kondukčního režimu je na obr. 21. Pokud se vnášené teplo nestíhá dostatečně rychle odvádět do základního materiálu, dojde k dosažení odpařovací teploty vlastního materiálu. Vznikají páry kovu, dochází k tvorbě plazmy a zvýšení průvaru, proces přechází do penetračního režimu.

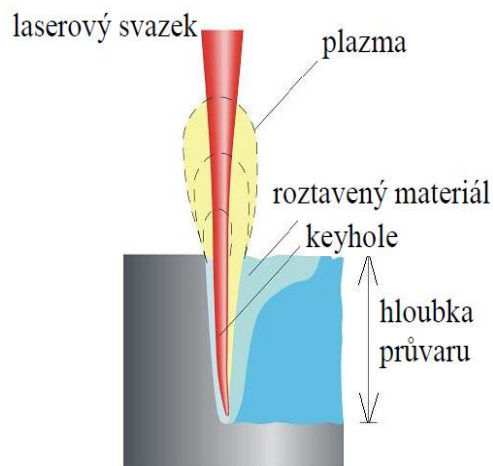


Obr. 21 kondukční režim svařování

2.3 Penetrační režim svařování [10,17,22,23]

Penetračního režimu svařování je docíleno zvýšením plošné hustoty výkonu, obecně nad 10^6 W.cm^{-2} . Působením vysoké hodnoty plošné energie začne docházet k řádově vyšší rychlosti ohřevu, než je rychlost odvodu tepla. V důsledku toho je rychle docíleno kritické hodnoty, při které dochází k rychlému tavení materiálu a tvorbě par kovů nad svařovaným povrchem. Vzniká kapilára o průměru 1,5-2 násobku průměru ohniska laserového svazku, tzv. keyhole neboli „klíčová dírka“, ta je naplněna parami kovu a obklopena nataveným materiálem. Díky mnohonásobným odrazům od stěn kanálku dochází ke zvýšení absorpce záření.

Vnitřní povrch keyhole je tvořen slabou vrstvou tekutého kovu, nutnou podmínkou zajištění stabilního procesu je dosažení energetické a tlakové rovnováhy, spolu s chováním plazmového obláčku. Podélným pohybem svazku dochází na přední straně



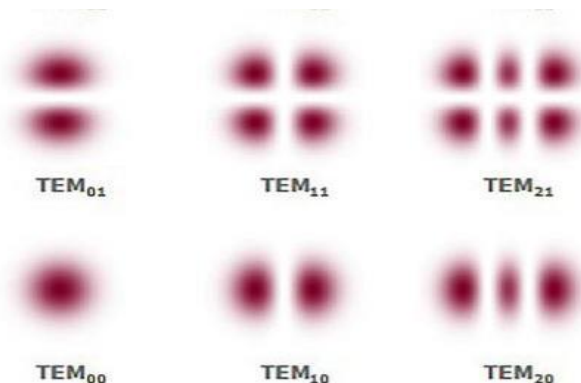
Obr. 22 Penetrační režim svařování

vytvořeného kanálu k ohřevu materiálu na teplotu odpařování a vzniklým reakčním tlakem par k přesunu nataveného materiálu k zadní části lázně. Dochází ke krystalizaci a tvorbě svarového spoje. Charakteristickým znakem takto vzniklých spojů je velký poměr hloubky k šířce závaru, který je umožněn hlubokým průnikem paprsku do materiálu. Používá se pro svařování velkých tloušťek materiálu, nebo pro spojování více vrstev najednou, Charakteristickým typem spoje je průvarový svar. Princip penetračního režimu svařování je na obr. 22.

2.4 Svařovací parametry [10,17,22,23]

Parametry svařování jsou faktory ovlivňující proces tvorby svarového spoje, podmiňují efektivitu využití laseru v konkrétních technologických procesech. Zejména se jedná o parametry výkonu, fokusačního systému a pomocné.

- výkon laseru je základním parametrem procesu svařování. V případě kontinuálního provozního režimu laserového svazku je charakterizován energií přímo úměrnou intenzitě záření a velikosti plochy příčného řezu svazku. Výkon laseru pracujícího v pulzním režimu charakterizuje délka pulzu a velikost energie. V principu je zvyšováním výkonu docíleno větší hloubky průvaru.
- parametry optiky - rozložení intenzity energie po průřezu svazku je charakterizováno módem laserového paprsku. Mód se mění v závislosti na typu použitého rezonátoru a vzdálenosti fokusačního bodu od výstupní čočky. Často používaný mód TEM₀₀ odpovídá charakteru rozložení podle Gaussovy křivky. Zásadní požadovanou vlastností pro použití v průmyslových aplikacích je jeho symetrie. Moderní přístroje umožňují vykreslení módu a nastavení symetrie. Příklady různých módů paprsku jsou na obr. 23.



Obr. 23 Typy módů TEM

- rychlost svařování - udává velikost dráhy uražené při procesu svařování za jednotku času. V případě konstantního výstupního výkonu laserového zdroje určuje rychlost svařování množství energie přivedené do materiálu neboli vnesené teplo. Jedná se o důležitý parametr, jelikož ovlivňuje teplotní procesy v materiálu, geometrii svaru a strukturu tepelně ovlivněné oblasti.

Při nízkých rychlostech svařování ($10-30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) dochází k většímu natavení okolního materiálu a ke zvětšení hloubky a šířky závaru, zároveň se zvětšuje i tepelně ovlivněná oblast. Díky většímu vnesenému teplu dochází k pomalejšímu ochlazování, což má příznivý vliv na strukturu materiálu.

Se vzrůstající rychlostí klesá hloubka penetrace, šířka závaru se snižuje až do mezní hodnoty určené průměrem keyhole. Díky rychlejšímu ochlazování dochází ke zvýšení tvrdosti svařovaného materiálu, tento jev je závislý na tloušťce materiálu, která ovlivňuje možnost odvodu tepla z místa svaru.

2.5 Ochranné plyny [10]

Ochranná atmosféra hraje v procesu svařování důležitou roli. Hlavním přínosem je ochrana svarového kovu před okolní atmosférou, která obsahuje nežádoucí kyslík, dusík, případně

vlhkost. Působením ochranné atmosféry je tak v první řadě zabráněno vzniku oxidů, nitridů a pórů. Svařování se ve většině případů odehrává v polohách PA a PB, významu zde nabývá hustota ochranného plynu. Při svařování laserem se používají čisté plyny i směsi. Základ směsných plynů je nejčastěji tvořený inertním plynem, jako je hélium nebo argon. V závislosti na svařovaném materiálu se přidávají aktivní plyny jako oxid uhličitý, dusík, nebo vodík. Vliv přídavných plynů spočívá v ovlivnění termických a metalurgických procesů. Srovnání vlastností ochranných plynů je uvedeno v tabulce 3.

Tab. 3 Vlastnosti ochranných plynů

Ochranný plyn	Molekulová hmotnost [g·mol ⁻¹]	Ionizační energie [eV]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Relativní hustota vztahená ke vzduchu
Argon - Ar	40	15,8	0,01732	1,38
Helium – He	4	24,6	0,15363	0,14
Oxid uhličitý – CO ₂	44	13,8	0,01615	1,52
Dusík – N ₂	28	15,6	0,02550	0,96

- Často používaným plynem je argon, jedná se o jednoatomový inertní plyn, bezbarvý, bez chuti a zápachu, získává se destilací ze vzduchu. Má malou tepelnou vodivost a nízký ionizační potenciál, což způsobuje, že při vyšších hodnotách vnášené energie dochází snadněji k jeho ionizaci a vzniku plazmy. Hustota je 1,78 kg/m³ což je asi 1,4x více než má vzduch, díky této vlastnosti příhodným způsobem klesá ke svarové lázni, čímž zajišťuje dobrou ochranu. Z toho důvodu je dostačujícím průtokem 12 - 20l/min.
- Druhým používaným inertním plynem je hélium. Rovněž jednoatomový plyn, bez barvy a zápachu, vyrábí se separací ze zemního plynu. Hustota plynu je 0,18kg/m³, tedy několikanásobně nižší než u vzduchu, hélium stoupá vzhůru, čímž snižuje efektivitu ochrany a zvyšuje potřebný průtok (30 - 35l/min). Hélium má vysoký ionizační potenciál, to způsobuje, že vznik plamy je minimální. Tepelná vodivost je výrazně vyšší než v případě argonu, svary mají díky tomu větší hloubku závaru. Nevýhodou je vysoká cena.
- Oxid uhličitý je reaktivní molekulový plyn, při vlastním procesu dochází k jeho disociaci na CO a O₂, čímž způsobuje možnost oxidace svarového kovu a tvorbu karbidů. Velikost ionizačního potenciálu podporuje vznik plazmy, hustota plynu podporuje chránící účinek.
- Dusík - dvouatomový reaktivní plyn. Způsobuje vznik nitridů, které mohou vést ke vzniku svarových chyb a snížení kvality svaru. V některých případech ale zlepšuje mikrostrukturu a odolnost proti korozi. Hustota je blízká vzduchu, nízký ionizační potenciál podporuje vznik plazmy.

Další funkcí ochranného plynu je ochrana zaměřovací optiky před případným rozstříkáním svařovaného materiálu a zplodinami vzniklými v procesu a zajištění odvodu plazmy. Volba plynu je závislá na typu a výkonu použitého laseru, svařovaném materiálu a jeho tloušťce, mechanických požadavcích na svar a v neposlední řadě na ekonomických nákladech.

Působením laserového svazku na materiál a ochranný plyn dochází v důsledku odpařování materiálu ke vzniku plazmy, která odebírá energii svazku. Tím dochází ke vzniku nerovnoměrné hloubky průvaru a snížení stability procesu. Odふうnutím plazmy je zvýšena účinnost působení svazku a zvýšena kvalita svaru.



Obr. 24 Typy přívodu ochranného plynu [10]

Odfouknutí plazmy a ochrana svarového kovu jsou důležité prvky svařovacího procesu, pro jejich správné fungování je třeba zajistit přívod ochranného plynu vhodným způsobem. Možné typy přívodu plynu ukazuje obr. 24. Směr proudícího ochranného plynu je orientován souose s laserovým svazkem v případě koaxiální a prstencové trysky, případně pod úhlem nastavení boční trysky. Výhodou koaxiální trysky je nižší spotřeba plynu a výborný těsnicí účinek, nevýhoda spočívá v malém efektu odfukování plazmy, čímž dochází k ohřevu vlastní trysky a výraznější interakce svazku s plazmou. V případě bočního přívodu plynu je nutné uvažovat orientaci trysky a směr proudění v závislosti na směru svařování. Poloha má vliv na charakter proudění ochranné atmosféry a s tím souvisejících účinků na proces tvorby svaru.

Pro každou svařovací aplikaci je důležité zvážit nastavení polohy trysky, případně provést kontrolu experimentem. Vzhledem k povaze procesu se používají vizualizační metody, které pomáhají s pochopením problematiky.

4 SVAROVÉ VADY [10,23,24,25,26]

Kvalita svarového spoje obecně závisí na druhu svařovaného materiálu a technologii svařování. Posuzování probíhá na základě celistvosti, velikosti, tvaru, požadovaného chemického složení a dosažení mechanicko-plastických vlastností. Odchytky svaru od vlastností předepsaných smluvním vzorkem, technickými podmínkami, nebo technickou normou se označují jako svarové vady. Obecnou klasifikaci vad uvádí norma ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů, část 1: Tavné svařování.

Vady svarového spoje jsou kontrolovány, neboť působí jako koncentrátoři napětí a podílí se tak na ovlivnění mechanických vlastností, jako je mez únavy. Mohou se také stát přímo iniciátory křehkého lomu.

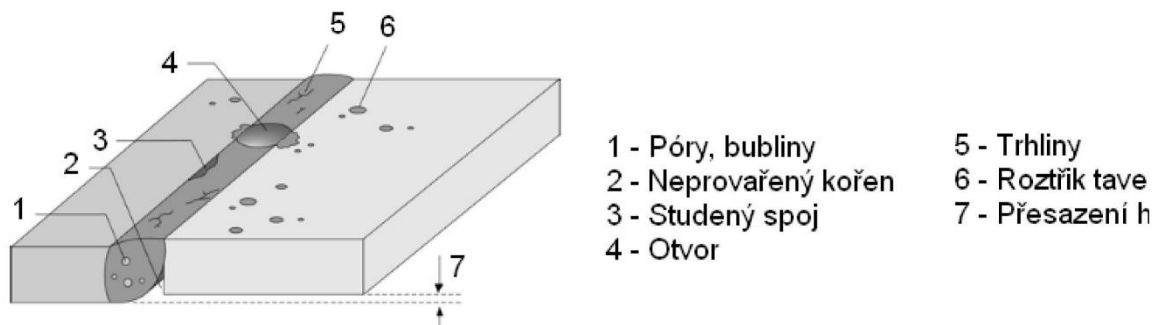
Vady výrobku potom můžeme obecně rozdělit na:

- zjevné - zjistitelné při prohlídce pouhým okem, případně jednoduchými pomůckami pro kontrolu
- skryté - pro jejich zjištění je potřeba speciálních přístrojů nebo laboratorní zkoušky

Zjištěné vady mohou být následně:

- přípustné - dovolené vzhledem k technické normě, nemají vliv na funkčnost, není nutné je odstraňovat
- nepřípustné - za hranicí povolených hodnot, mohou být dále opravitelné nebo neopravitelné

Základní rozdělení vad ve svarových spojích je podle geometrie a polohy výskytu ve svaru, ilustrační znázornění ukazuje obr. 25.



Obr. 25 Vady svarového spoje

Z geometrického hlediska jsou vady rozlišovány na:

- plošné - trhliny, mikrotrhliny, neprůvary, studené spoje, nespojitost návaru a základního materiálu
- bodové - mikropóry, menší sférické vměstky
- prostorové - póry (plynové dutiny, bubliny), vměstky (tavidlové, oxidické, struskové), staženiny (kráterové, mezidendritické)

Podle polohy ve svaru potom:

- povrchové - trhliny, zápaly, neprůvary
- vnitřní - póry, bubliny, vměstky, staženiny

Podobně jako u ostatních metod tavného svařování, i při spojování materiálu laserovým paprskem může docházet ke vzniku defektů snižujících kvalitu svaru. V případě svařování laserem má na vznik vad vliv rychlost pohybu paprsku a jeho intenzita, případně nečistoty

ochranné optiky, dále pak čistota svarových spojů, přítomnost par a svařovací postup. Podle normy ČSN EN ISO 13919-1 Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel jsou jednotlivé svarové spoje (nikoliv celé výrobky) určeny stupni jakosti, viz tab. 4. Každý spoj na daném výrobku může mít předepsaný jiný stupeň.

Tab. 4 Stupně jakosti svarových spojů [25]

Skupina - Symbol	Stupeň jakosti
D	nízký
C	střední
B	vysoký

Jednotlivé druhy přípustných i nepřípustných vad jsou obsaženy v přehledném katalogu normy ČSN EN ISO 6520-1 a jsou rozděleny do šesti skupin, viz tab. 5. Vybrané vady vyskytující se u laserového svařování jsou dále uvedeny v normě ČSN EN 1011-6 Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 6: Laserové svařování.

Tab. 5 Přehled svarových vad [25]

Skupina	Název skupiny	Popis vady
1	Trhliny	mikrotrhliny, trhliny příčné, podélné, hvězdicové, kráterové, rozvětvené, skupiny trhlín
2	Dutiny	plynové, pórovitost, shluk pórů, protáhlý pór, povrchová pórovitost, staženiny, mikrostaženiny
3	Pevné vměstky	vměstky pevné, struskové, tavidlové, oxidické, kovové, oxidický povlak (svrašťení)
4	Studené spoje a neprůvody	Nedostatečné spojení (natavení) svarového kovu a ZM nebo mezi jednotlivými vrstvami SK, neprovařený kořen, jehlice
5	Vady tvaru a rozměru	nesprávný tvar povrchů svaru, zápaly, vrub v kořeni, mezi housenkami, nadměrné převýšení, protavení, nesprávný přechod svaru, přetečení, přesazení

Jednotlivé vady jsou v normě zavedeny pomocí referenčního čísla, přičemž třímístné číslo udává hlavní skupinu vad, čtyřmístné potom přidruženou specifikaci vady. Každé konkrétní vadě je přiřazeno vysvětlení a popis.

Pro laserové svařování je typickou vadou pórovitost. Jde o plynové dutiny, převážně kulovitěho tvaru, které jsou lokalizovány ve svaru. Normou jsou rozlišeny jednotlivé póry i jejich skupiny. Mezi hlavní příčiny vzniku patří například nestabilita a kolaps keyhole, nevhodná rychlost svařování a vysoká viskozita svarové lázně. Další příčinou může být velká rychlost tuhnutí kovu. Pokud je před začátkem výroby stanoven stupeň jakosti dle normy ČSN EN ISO 13919-1, jsou dále určeny mezní hodnoty pro rozměry pórů. V případě, že se póry shlukují, je jejich výskyt nepřijatelný, neboť by mohlo dojít k jejich propojení a vzniku lomové plochy.

Další typickou vadou laserového svaru je trhlina za horka, ke které dochází smršťováním při tuhnutí kovu a vzniku výrazných vnitřních pnutí. Trhlina se řadí mezi nebezpečné vady z důvodu možnosti dalšího šíření ve svaru. Dle normy ČSN EN ISO 13919-1 se nesmí vyskytovat v žádném ze zmíněných stupňů jakosti. Pokud dojde k jejímu vytvoření, musí být eliminována.

5 TESTOVÁNÍ SVARŮ [14,16,27,28,29,30]

K základním požadavkům na výrobky platí bezpečnost a spolehlivý provoz. K ověření daných skutečností jsou používány kontroly vlastností používaných materiálů a svarů. Ke kontrolám a pro zaručení požadovaných vlastností se používají standardizované zkoušky.

Obecně se zkoušky svarových spojů dělí na nedestruktivní a destruktivní. V prvním případě nedochází k porušení zkoumaného vzorku, zkoušku lze tedy použít nejen na konci výroby, ale i v průběhu. Výpis používaných metod je uveden níže.

Nedestruktivní zkoušky:

- vizuální kontrola
- zkouška ultrazvukem
- zkouška prozářením
- zkouška kapilární
- zkouška magnetická prášková

Destruktivní zkoušky:

- zkouška tahem
- zkouška tvrdosti
- zkouška lámavosti
- zkouška rázem v ohybu
- zkouška hloubením
- zkouška makro a mikrostruktury

5.1 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje [14,29,30]

Výhodou nedestruktivních metod je, že nedochází k porušení výrobků a lze je nadále používat. Zkoušením je ale prokázána pouze část dosažených užitných vlastností svarů. Bližší dělení metod je dále určeno tím, zda jsou zkoumány vady povrchové, nebo vnitřní. Přesnou metodiku udává norma ČSN EN IS 17637 Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů.

Povrchové vady:

- vizuální metoda
- penetrační (kapilární) zkouška
- magnetická prášková zkouška

Vnitřní vady:

- prozářením RTG
- ultrazvukem

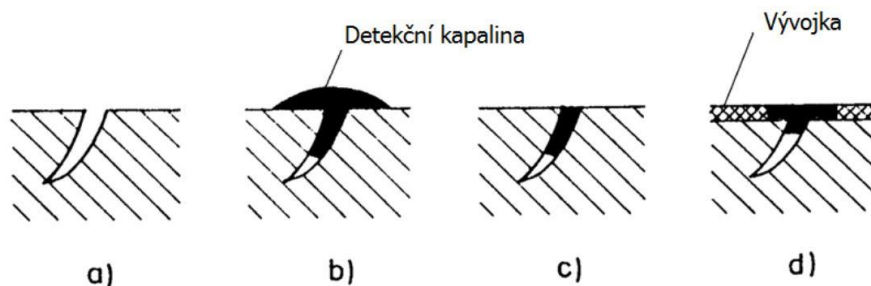
- Vizuální kontrola

Jedná se o běžnou a jednoduchou metodu testování svarů. Zjištění vad a nepravidelností výrobku, resp. svarového spoje je prováděno pouhým zrakem bez pomůcek, případně jednoduchými zařízeními jako jsou lupy, etalony povrchu, nebo měrky svarů. V případě potřeby nahlédnutí do nepřístupných míst potom pomocí sofistikovanějších zařízení jako endoskopy, případně kamer. V obou případech je nutné dostatečné osvětlení povrchu ať už denním, či umělým světlem. Bližší požadavky kontroly udává již zmíněná norma.

- Penetrační (kapilární) zkouška

Zkouškou je možné zjišťovat vady, které bezprostředně souvisí s povrchem zkoušeného vzorku a jsou otevřené, aby do nich mohla proniknout detekční kapalina. Princip je založen na vzlínivosti a smáčivosti kapalin. Pro provedení zkoušky je nutné povrch očistit od nečistot a okují a to mechanicky i chemicky, aby zkoušený povrch umožnil vniknutí kapaliny do kterékoliv vady. Následně je nutné úplné osušení. Dále je nanesen penetrant a očištěn jeho přebytek. Indikace se vyvolá nanesením suché či vodné vývojky. Po 10-30 min působení může dojít k inspekci. Vývojka vytváří kontrastní podklad pro kapalinu vzlínající z dutin vad a umožňuje tak lepší viditelnost. Povrch se dále vizuálně zkoumá a posuzují se indikované vady.

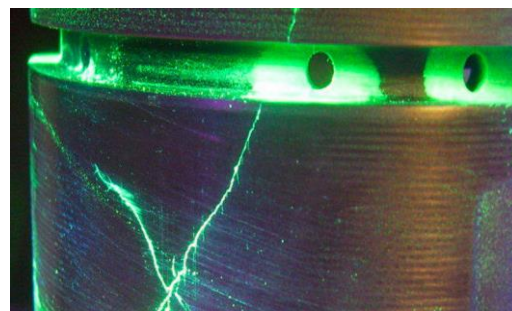
Podle detekčních prostředků se rozeznává metoda barevné indikace, kdy se vada projeví jako kontrastní a metoda fluorescenční, při které se vada projeví po ozáření ultrafialovým světlem - světelnou indikací, jak je vidět na obr.26. Kapilární zkoušku blíže specifikuje norma ČSN EN ISO 3452-1.



Obr. 26 Princip kapilární zkoušky

- Magnetická prášková zkouška

Metoda umožňuje detekovat povrchové, nebo podpovrchové vady (do hloubky max. 2-3 mm). Je založena na principu zviditelnování magnetických siločar na povrchu feromagnetických materiálů. V případě, že na povrchu nebo pod povrchem existuje vada, která není feromagnetická (např. bublina, struska, vměstek), dojde k ovlivnění magnetických siločar tak, že ty vadu obcházejí, mění tím svůj tvar a na povrchu zkoumaného materiálu vytváří tzv. rozptylové magnetické pole. Kontrola je založena na zkoumání rozptylu magnetického toku, který je závislý na přítomnosti nečistot jako jsou trhliny, a náhlých změn magnetických vlastností, které způsobuje např. struska.



Siločáry vystupující na povrch se zviditelňují pomocí jemného železného prachu, který se používá buď suchý, nebo rozptýlený ve vhodné kapalíně (petrolej, případně fluorescenční roztok - viz. obr. 27. Zkoušený předmět je magnetizován průchodem elektrického proudu, nebo pomocí elektromagnetu.

- Ultrazvuková zkouška

Metoda se používá ke zjištění vnitřní nehomogenity ve výrobcích. Je založena na principu sledování odrazu ultrazvukových vln při interakci s rozhraním dvou prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi. Rychlost šíření vln je závislá na druhu prostředí a frekvenci vlnění. Pomocí sondy se ultrazvuk vysílá v krátkých impulsích do zkoušeného materiálu. Vady se projevují jako odrazné plochy signálu, podle velikosti časového zpoždění se na zobrazují na obrazovce měřicího přístroje. Zkouškou lze obecně lépe zjistit vady, jejichž orientace je přibližně kolmo ke svazku ultrazvukových vln, plošné vady orientované rovnoběžně na směr šíření vln jsou zjistitelné hůře. Objemové vady jako vměstky a póry směr jsou rovněž špatně zjistitelné. Metodu lze použít i na nekovové materiály. Používá se metoda průchodová a odrazová.

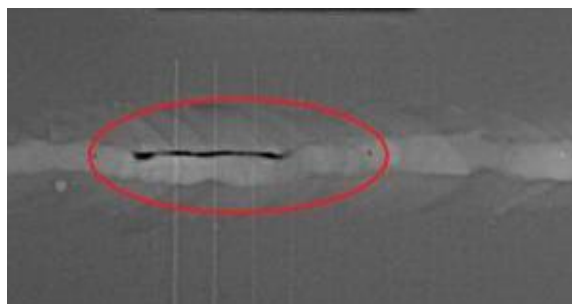


Obr. 28 Ultrazvuková zkouška

K provádění běžných zkoušek je nutná vhodná příprava povrchu zkoumaného výrobku. Povrch by měl být čistý, případně zbavený rozstříků svarového kovu, nátěrů, volných okují a podobných nečistot. Citlivost ultrazvukových souprav se nastavuje na etalonech, jejichž materiál odpovídá zkoušenému.

- Zkouška prozáření (RTG)

Metoda patří ke starším nedestruktivním zkouškám. Slouží především pro zjišťování vnitřních, někdy i pro povrchově nepřipustných vad. Princip je založený na zeslabování intenzity rtg. paprsků při průchodu materiálem. Zkoumaný svar je z jedné strany prozařován, pocházející záření je ze strany druhé zachycováno radiografickým filmem. Lze tak zjistit dutiny, staženiny a vměstky, vady jsou vidět v místech, kde dojde k jejich menšímu pohlcení a na filmu vytvoří tmavší místa. Na základě charakteristiky záření se dá sledovat mikrostruktura, případně chemické složení materiálu. Metoda RTG je často kombinována se zkouškou ultrazvukovou. Norma ČSN EN 1435.



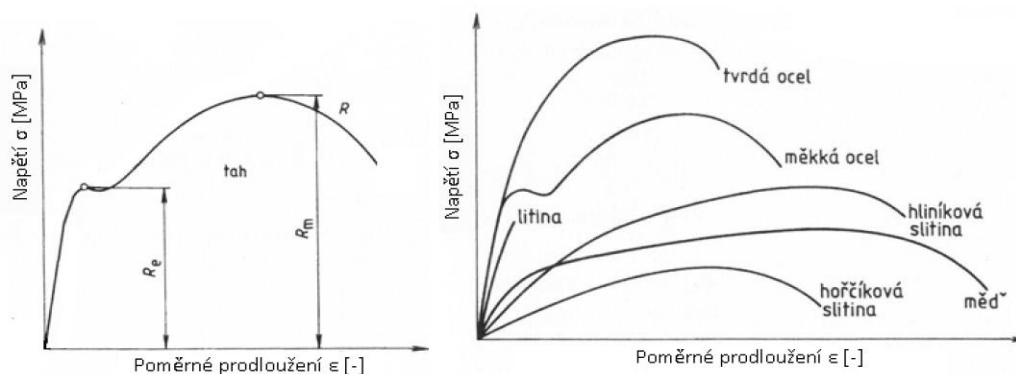
Obr. 29 Zkouška prozáření

5.2 Destruktivní zkoušky svarových spojů [14,28]

Při použití destruktivních metod dochází k porušení soudržnosti zkoumaných vzorků. Zkoušky slouží pro početné série výrobku, kdy je třeba stanovení vhodného postupu svařování. Zásadní vliv na pevnost spoje má kvalita svaru, mechanické a metalografické zkoušky jsou proto důležité a přínosné pro stanovení pevnostních limitů daného výrobku.

- Příčná zkouška tahem

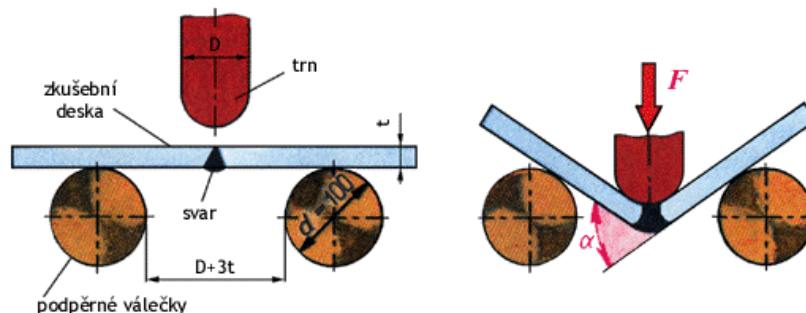
Jedná se o základní statickou zkoušku pro ověření pevnostních a plastických vlastností materiálu, Princip tahové zkoušky spočívá v plynulém zatěžování normalizovaného zkušebního vzorku. Vlivem působící síly dochází k deformaci jednoosým tahovým zatížením až do bodu mezního stavu. Výstupní informací ze zkoušky je tahový diagram závislosti působícího zatížení na prodloužení.



Obr. 30 Tahový diagram

- Zkouška ohybem

Označovaná také jako zkouška lámavosti, používá se k vyhodnocení spolehlivosti svarového spoje. Podstatou metody je namáhání zkušební vzorku statickou ohybovou silou. Zkušební tělesa se testují jak ze strany líce tak kořene svaru, Průměr ohýbacího trnu je určen jako čtyřnásobek tloušťky zkoumaného tělesa. Působením síly na trn následně dochází k ohýbání vzorku až do předepsaného úhlu, jak je možné vidět na obr. 31. Strana s dotykem trnu je namáhána tlakem, opačná pak tahem. Provedení zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 5173.



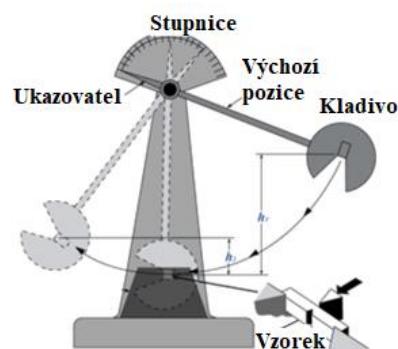
Obr. 31 Zkouška ohybem

- Zkouška rozlomením

Jedná se v podstatě o poměrně nenáročnou zkoušku, spočívá v rozlomení svarového spoje takovým způsobem, aby bylo možné zkoumat svarovou plochu. K dosažení lomu může být použito zatížení krutem, nebo dynamickým i statickým ohybem. Vznik lomu je přímo ovlivněn teplotou a tvarem vrubu. Jde o relativně snadnou a jednoduchou metodu ke zjištění typů, rozmístění a rozměrů vad jako neprůvary, studené spoje, vměstky, trhliny a dutiny v ploše lomu. Zkoušený svar je rozdělen na několik zkušebních vzorků, které jsou opatřeny vrubem tak, aby byl zajištěn lom ve svarovém kovu. Postup zkoušky blíže specifikuje norma ČSN EN 1320.

- Zkouška rázem v ohybu

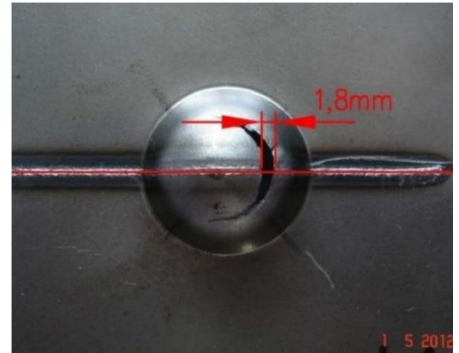
Označovaná také jako zkouška houževnatosti. Houževnatost představuje mechanickou energii, kterou je potřeba vynaložit na plastickou deformaci materiálu. Hlavní význam má v oblasti namáhání konstrukčních materiálů, kde charakterizuje jejich odolnost proti vzniku křehkého lomu. Zkouška rázem v ohybu patří mezi dynamické, je to metoda rychlá a relativně jednoduchá. Zkušební tělesa opatřená normalizovaným vrubem se vloží do přístroje zvaného Charpyho kladivo, na ustavený vzorek následně udeří břit kladiva a přelomí ho. Kladivo má definovanou hmotnost a pomocí ukazatele na stupnici je dále zjištěna energie spotřebovaná na porušení vzorku. Výsledkem experimentu je hodnota nárazové práce nutné k rozlomení zkušebního tělesa, dále se hodnotí charakter lomu (tvárný nebo štěpný).



Z nárazové práce je stanovena hodnota vrubové houževnatosti. Zkoušku blíže specifikuje norma ČSN EN ISO 9016.

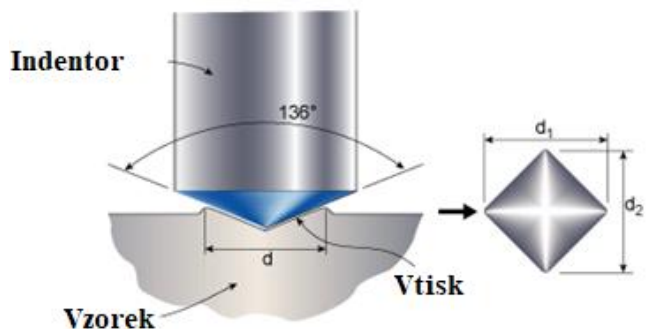
- Zkouška hloubením podle Erichsena

Metoda se používá pro stanovení schopnosti materiálů plasticky se deformovat, nejčastěji se používá pro stanovení vhodnosti plechu k hlubokotažnosti. Princip spočívá ve vtlačování kulového tažníku do tělesa z plechu. Trhlina svarového spoje ukazuje na nevyhovující svar, žádoucí je dá se říci trhlina mimo, případně v jiném směru než je spoj, jak je vidět na obr. 33. Následně je změřen posuv razidla, získaná hodnota vypovídá o schopnosti plechu k hloubení, respektive o kvalitě povedeného svarového spoje. Postup provádění zkoušky specifikuje norma ČSN EN ISO 20482.



- Zkouška tvrdosti podle Vickerse

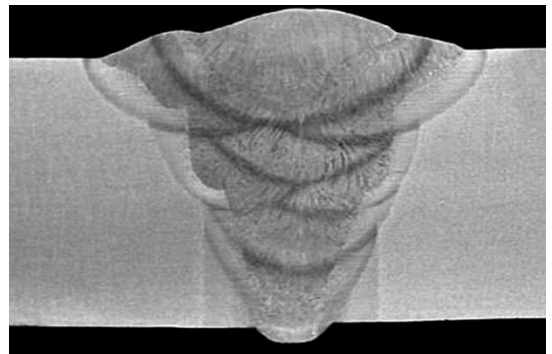
Jedná se o rozšířenou metodu měření, je vhodná pro měření průběhu tvrdosti na řezech materiálů označovaná jako test mikrotvrdosti. Patří mezi statické zkoušky, princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa (indentoru) do zkoumaného materiálu. Indentorem je diamantový hrot definované geometrie (vrcholový úhel 136°). Následně je zjišťována deformace materiálu měřením vzniklého vtisku, délky úhlopříček společně s použitou vtláčovací silou definují tvrdost podle Vickerse (HV). Přesný způsob provedení je popsán normou ČSN EN ISO 6507-1.



- Metalografické zkoušky

Z důvodu přesnější interpretace mechanických zkoušek je nutné nahlédnutí přímo do zkoušených vzorků. Zkoušky jsou zaměřeny na zobrazení vnitřních struktur, pro správné pozorování je nutná příprava metalografických vzorků, základem je výběr reprezentativního místa svarového spoje, následně je provedeno opracování k přesnému vyhodnocení. Podle velikosti přiblížení se metoda dělí na makroskopickou a mikroskopickou.

Pomocí makroskopické zkoušky se stanovuje charakter svarového spoje. Kontrola je prováděna na vzorcích zhotovených tak, aby bylo možné je pozorovat v příčném řezu, jak je vidět na obr. 35. Plochy vzorku jsou před zkoumáním přebroušeny a vyleštěny. Pozorování probíhá pouhým okem, nebo za malého zvětšení - použitím lupy, případně optického mikroskopu. U svaru je hodnocen tvar, způsob kladení svarových vrstev, šířka a charakter tepelně ovlivněné oblasti, případně odmíšení základního kovu



Obr. 35 Kontrola makrostruktury

Mikroskopická zkouška je založena na stejném principu - tedy pozorování příčného řezu svarového kovu. Odlišnost spočívá ve zkoumání vzorku, zde se vyhodnocují hranice zrn a struktura kovu. Již po vyleštění lze na výbrusu pozorovat například charakter a způsob rozložení nekovových vměstků v oceli, způsob vyloučení grafitu v litinách, případně mikroskopické nečistosti. Pro lepší zviditelnění mikrostruktury se používá leptání, pro nelegované a nízkolegované oceli a litiny bývá k leptání použit Nital, pro vysokolegované potom speciální leptadla. Detaily nelze pozorovat pouhým okem, je zapotřebí mikroskop. Používané zvětšení se pohybuje od 30x do 2000x, jak lze vidět na obr. 36. Výstupem zkoumání je znalost vzhledu mikrostruktury a rozložení základních strukturních fází. Provedení zkoušky blíže specifikuje norma ČSN EN 1321.



Obr. 36 Kontrola mikrostruktury

6 STUDIUM PROUDĚNÍ A CHEMICKÉHO SLOŽENÍ [10,33]

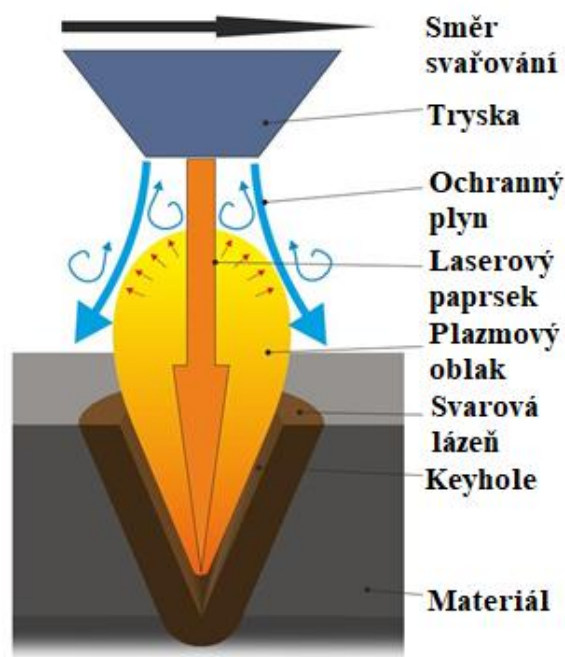
Nejen při laserovém svařování hrají důležitou roli pro kvalitu svaru ochranné plyny a jejich chování. V potaz musí být brány parametry jako druh plynu, nastavení průtoku, volba vhodné hubice a difuzoru a další proměnné. Pro usnadnění pochopení problematiky proudění kapalin, respektive plynů existuje celá řada metod.

Dalším důležitým faktorem v procesu je chemické složení svařovaného materiálu, respektive jeho povrchové vrstvy. Látky obsažené v přímé blízkosti svarové lázně jsou vystaveny extrémním teplotám, může docházet k výrazné tvorbě plynů procesem sublimace a vývinu dýmu, obsahujícího množství drobných částic.

6.1 Studium proudění [10,19,20]

V případě proudění plynů při svařování je třeba brát zřetel na vliv teplotního ovlivnění probíhajících jevů. Zobrazovacími postupy jsou například stínová a šlířová metoda nebo mechanické způsoby vizualizace, které jsou velmi názorné v praktických podmínkách. Patří mezi ně například metoda nit'ových sond, kapalinových filmů či prášková.

Při svařování laserem se používá velmi vysoká hustota fokusovaného laserového paprsku. Díky tomu dochází k vysoké rychlosti tavení materiálu. Paprsek prochází vzniklými parami a dýmem a předává jim část své energie. Jedná se o proces nežádoucí, protože takto odebraná energie následně „chybí“ v místě svařování, jde tedy o ztrátu výkonu. Páry se absorbovanou energií přeměňují na plazmu, která se rychle šíří. Rychlost expanze plazmy je výrazně ovlivněna druhem použitého ochranného plynu. Dochází k interakci plynu s plazmou a vzniku nepředvídatelných turbulentních proudění, viz obr. 37. Proces je velmi složitý z důvodu posuvu svařovacího procesu ve směru svařování a neustálého míšení relativně studeného ochranného plynu a horké plazmy.



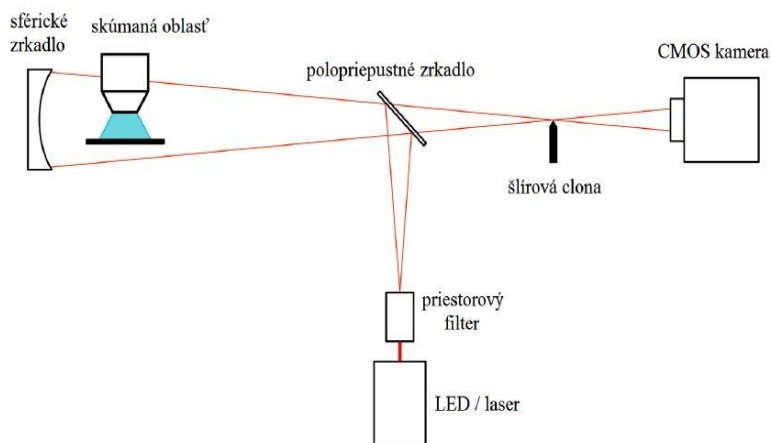
Obr. 37 Proudění ochranné atmosféry

6.1.1 Šlířová metoda [10,17,20]

Označovaná také jako 'schlieren', používá se pro vizualizaci změny indexu světla v transparentních prostředích (kapalném, plynném, pevném i plazmatu), který je způsoben termodynamickými pochody nebo změnou hustoty. V současnosti nachází uplatnění v aerodynamice, balistice a při analýze svařovacích procesů. Při svařování se metoda používá na pozorování proudění plynů, případně plazmy v průběhu procesu.

Principem metody je lom světla s různými indexy generovaného z nerozbíhavého zdroje světla, jako je laser nebo dioda. Paprsek světla je vyslán do pozorované oblasti, průchodem prostředími s různými indexy lomu je mírně rozptýlen a dále fokusován do ohniska pomocí druhé optické čočky - spojky s definovanou ohniskovou vzdáleností. Druhá spojka se stejnou

ohniskovou vzdáleností, umístěná za ohniskem usměrní světelný signál do koncové kamery nebo objektivu fotoaparátu. Umístěním clony do ohniska před poslední čočkou dojde k odstínění určité části rozptýleného světla. Zobrazení je možné nastavit a ovlivnit pomocí tvaru použité clony. Prošlý paprsek je následně zobrazen přes fotoaparát nebo kameru jako snímek se světlými a tmavými místy, respektive stíny v pozorované oblasti, čímž je docíleno vytvoření pozorovatelného efektu proudícího plynu. K zaznamenání procesu se používají vysokorychlostní CMOS kamery. Konfigurace sestavení může být realizovaná jako na obr. 38, nebo bez polopropustného zrcadla - přímo, přesné seřízení obou způsobů je však relativně obtížné.



Obr. 38 Princíp šlířové metody

6.1.2 Metoda niťových sond [19]

Je založena na mechanickém účinku působících plynů na obtékané povrchy. Jedná se o často používanou jednoduchou metodou vizualizace proudění. Princip spočívá v připevnění niťových sond na povrch obtékaných modelů. Za nejvhodnější jsou považovány hedvábné nitě s délkou asi 20 mm. Nitě jsou na jedné straně roztřepené, na druhé připevněné k modelu. Na základě jejich orientace při proudění plynu je možné určovat směry místních rychlostí obtékajícího média. Z chování nití je rovněž možné posuzovat charakter obtékání - jsou-li v klidu, nacházejí se v laminární oblasti, jemné kmitání naznačuje turbulentní mezní vrstvu, prudký trhavý pohyb značí oblast turbulentního odtržení. Metoda se úspěšně používá v atmosférických tunelech, ale je možné ji aplikovat např. na letadlo za letu, na obr. 39 je ve zjednodušené podobě použita pro vizualizaci proudění na karoserii automobilu.



Obr. 39 Využití niťových sond

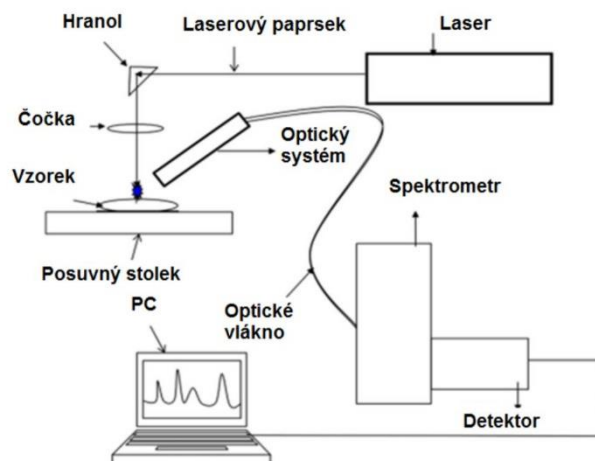
6.2 Analýza chemického složení povrchu []

Jak bylo uvedeno v předchozí podkapitole, vlivem mísení ochranného plynu a plazmy dochází ke vzniku těžko předvídatelných proudění. Při svařování materiálu uvolňujících velké množství zplodin se proces ještě více komplikuje o přítomnost drobných spalínových částic. Pro bližší prozkoumání charakteru a složení takto vzniklých částic je nutné bližší poznání chemického složení svařovaných materiálů.

Chemické složení základního materiálu lze vyčíst z materiálového listu, zjištění složení povrchové vrstvy je složitější. Z existujících analýz povrchů se jako proveditelné a vypovídající jeví metody Spektrometrie laserem buzeného plazmatu (LIBS) a Energiově-Disperzní mikroanalýza (EDX).

6.2.1 Spektrometrie laserem buzeného plazmatu (LIBS) [10,31]

Základním principem metody je iniciace vzniku mikroplazmatu pomocí laserového zdroje. Interakcí laseru se vzorkem dochází k absorpci budícího záření, čímž dojde k jeho lokálnímu zahřátí a při dostatečné intenzitě záření i k ablacii. Následně dojde ke vzniku mikroplazmatu a excitaci elektronů přítomných prvků, které vyzařují specifické záření, jež je detekováno. Parametry ovlivňující ablační pochody jsou čas a vlnová délka záření. Emitované záření dále putuje do monochromátoru a je vyhodnoceno spektrometrem, který na základě vlnových délek zachyceného záření umožní určit prvkové složení vzorku. Dle intenzity záření je možné blíže specifikovat koncentrace jednotlivých prvků. Princip metody je na obr. 40.

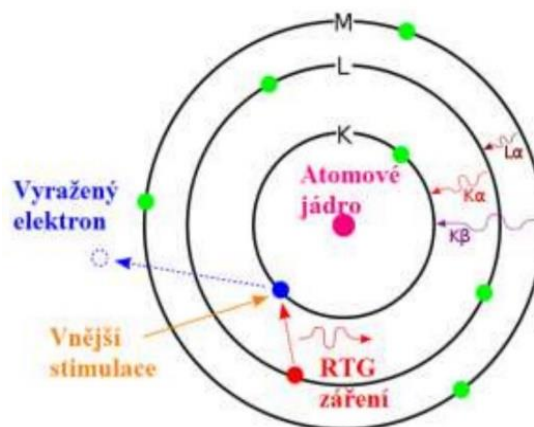


Obr. 40 Princip LIBS analýzy

6.2.2 Energiově-Disperzní mikroanalýza (EDX) [31]

Jedná se o metodu využívanou k určení chemického složení materiálu, nebo pro jeho elementární analýzu. Je založena na interakci proudu elektronů se vzorkem. Základním podkladem analýzy je, že každý prvek má vlastní jedinečnou atomovou strukturu a energie rentgenového záření dosahuje pro každý prvek specifické hodnoty.

Princip spočívá v tom, že vzorek je ozářen paprskem vysoce nabitých částic (elektronů). Zásahem vzorku primárními elektrony dojde k nahození zasažených atomů do vyšších energetických hladin, viz obr. 41. Při přechodu zpět do nižších hladin se přebytečná energie vyzáří ve formě krátkovlnného elektromagnetického záření - RTG, které je pro každý prvek charakteristické. Doplněním elektronového mikroskopu vhodným spektrometrem je možné jej použít jako prvkový analyzátor. Metoda má svá omezení, např. lehké prvky jako uhlík takto není možné analyzovat.

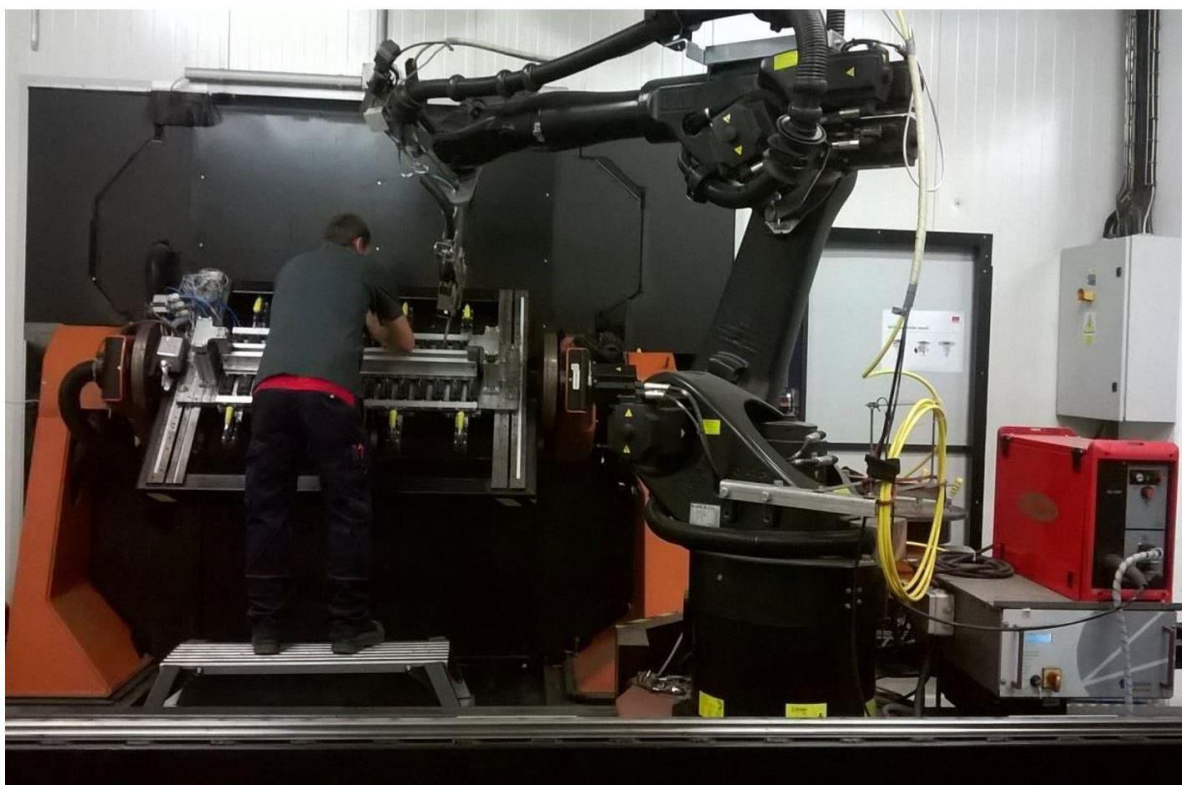


Obr. 41 Princip EDX analýzy

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [8,9]

Experiment byl navržený s ohledem na materiál používaný pro konstrukci roštu a s důrazem na možnost pozorování chování vznikajících zplodin. Svařovací prostor je v základu vybaven jednoduchým odsávacím zařízením. Vzhledem k tomu byla navržena úprava odsávacího systému, respektive vedení pro odtaž spalin.

Samotný proces svařování byl realizován ve firmě ACO Industries v prostorách laserového svařovacího pracoviště, viz obr. 42. Vlastní uzavřená místnost, tzv. buňka, slouží k oddělení pracoviště od zbytku výroby, nachází se v oddělení divize žlabů. Pracoviště je odděleno ze dvou důvodů: prvním je bezpečnost práce související s automatizovaným pohybem robota, druhým je nutnost ochrany pracovníků před vznikajícím rozptýleným laserovým zářením, které by mohlo vést k vážným nehodám. Přístup do buňky je umožněn pouze proškolenému personálu, případná obsluha se smí v prostoru s pracujícím robotem pohybovat pouze s ochrannými brýlemi ze speciálního materiálu nepropouštějícího nebezpečné záření.



Obr. 42 Robotizované pracoviště ve firmě ACO Industries

Ve vlastním prostoru se nachází pracovní robot s laserovou svařovací hlavou, laserový zdroj, napájení robota, jednoduché centrální odsávání a polohovatelné stoly s možností upnutí přípravků pro zakládání polotovarů spadajících do širokého spektra vyráběného sortimentu.

Pro vlastní proces svařování byl použit polovodičový laser. Zdroj je od firmy Laserline, označení LDM 2500-60. Maximální výkon svařování je 2500W, vlnová délka je variabilní v rozsahu 900 nm - 1080 nm.

K dopravě laserového paprsku ze zdroje do svařovací hlavy slouží optické vlákno o průměru 900 μm . Ochranný plyn je přiváděn z čelní části robota tvarovou trubicí o průměru 15 mm. Ohnisková vzdálenost laseru je 222 mm, kvalita paprsku určená parametrem BPP odpovídá 66 mm.mrad. Průměr svazku v ohnisku činí 1,95 mm, z daných informací je možné určit výkonovou hodnotu v ohnisku pomocí vzorce (6.1).

$$I = \frac{P}{S_{foc}} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D_{foc}^2} = \frac{4 \cdot 2500}{\pi \cdot 0,195^2} = 8,34 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (6.1)$$

kde: P - výkon laseru

S_{foc} = plocha ohniska

6.1 Charakteristika svařovaného materiálu []

Materiál má na zásadní vliv na vytvořený svar, je proto potřeba věnovat jeho charakteristice zvýšenou pozornost. Metalurgické pochody ve svaru přímo ovlivňují výslednou svařitelnost materiálu, což se následně projevuje přímým vlivem na mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti vytvořeného spoje. V současné době existuje velké množství použitelných konstrukčních materiálů, z důvodu vyhodnocování svařitelností se ocelí rozdělují do jednotlivých skupin, blíže určených normou.

Pro vypovídající schopnost experimentu bylo při svařování vzorků použito stejného materiálu, jako je požadovaný materiál konkrétního roštu. Jedná se o ocel S235JR, která spadá do skupiny nízkouhlíkových jemnozrnných, nelegovaných ocelí, o obsahu maximálně 0,24 hm. % C, 1,5 hm. % Mn s nízkým obsahem fosforu (P) a síry (S). Obsah uhlíku a manganu má zásadní vliv na mechanické hodnoty materiálu, především na pevnost.

Chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu je uvedeno v tabulce 6 a 7 respektive. Hodnoty jsou převzaty z atestu, který poskytuje dodavatelská společnost hutního materiálu.

Tab. 6 Chemické složení použitého materiálu

	C [hm. %]	Si [hm. %]	S [hm. %]	P [hm. %]	Mn [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]
S235JR	0,13	0,02	0,008	0,014	0,52	0,02	0,01

Tab. 7 Mechanické vlastnosti použitého materiálu

	Rm	ReH	A5
S235JR	443	327	33

Na výsledné vlastnosti svarů má dominantní vliv hrubozrnná oblast v tepelně ovlivněné oblasti. S rostoucím obsahem uhlíku dochází v materiálu ke zvyšování následujících parametrů:

- tvrdost vznikajícího martenzitu
- náchylnost k zakalení během svařování
- náchylnost na vznik studených trhlin v TOO

Pro vyhodnocení vlivu chemického složení na tvrdost hrubozrnné oblasti se používá uhlíkový ekvivalent oceli C_e . Parametr bere v potaz příspěvek jednotlivých prvků obsažených v materiálu, které mají vliv na tvrdost výsledné struktury. Dle normy ČSN EN 1011-2 se uhlíkový ekvivalent určí pomocí vztahu (6.2):

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \text{ [hm. \%]} \quad (6.2)$$

Pokud platí, že $C_e \leq 0,45$ hm. % a zároveň $C \leq 0,24$ hm. % a tloušťka svařovaného materiálu nepřesáhne 25 mm, není potřeba pro proces použít speciálních opatření, jako např. předehřev. Rychlost ochlazování se v tom případě nedostane v ARA diagramu do oblasti martenzitu.

Uhlíkový ekvivalent vypočítaný pro ocel S235JR podle uvedeného vzorce a hodnot chemického složení z atestu.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} = 0,13 + \frac{0,52}{6} + \frac{0,02}{5} + \frac{0,01}{15} = 0,22 \text{ [hm. \%]}$$

Velikost C_e konkrétního vzorku oceli se pohybuje pod hranicí $C_e \leq 0,45 \text{ hm. \%}$ a zároveň $C \leq 0,24 \text{ hm. \%}$, svařovaný plech má tloušťku 5 mm. Z toho vyplývá, že jsou splněny podmínky pro vznik vhodné struktury i bez nutnosti použití předehřevu. Je nutné zmínit, že takto stanovený ekvivalent platí pro obloukové metody svařování, metoda laseru má porovnání vyšší rychlost ochlazování, předehřev by měl teoreticky být použitý už při nižších hodnotách C_e . V případě použitých materiálů se tento jev nepředpokládá, svařování probíhá bez předehřevu.

6.2 Experiment I. [9]

Pro experiment byly z daného materiálu vypáleny plechy o rozměrech 150x150 mm. Plechy byly vyřezány na jedno z laserových řezacích strojů, kterými firma disponuje. Návrh svařovaných vzorků je na obr. 43.

Jedním z požadavků na pokus byla minimální příprava svařovaných ploch vzorků. Požadavek vychází z minimalizace času přípravy - čištění a odmaštění konkrétních polotovarů pro rošt by bylo časově velice náročné, vzorky tedy byly ponechány ve stavu odpovídajícím reálným polotovarům.

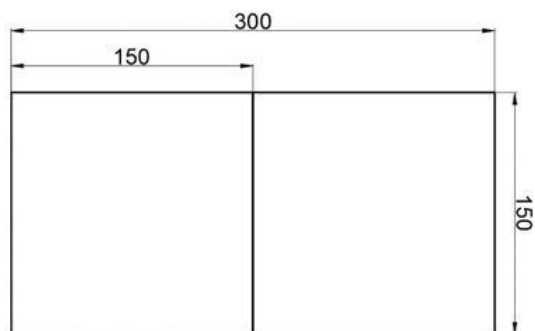
Z důvodu přesného zakládání polotovarů vzorků byl vyroben jednoduchý upínací přípravek. Za pomoci obsluhy robota byly připraveny ovládací programy pro svařování vzorků. Programy byly nastaveny tak, aby bylo jednoduše možné měnit některé svařovací parametry.

Vzorky plechů - poloviny k sobě byly před samotným laserovým svařováním nastehovány ruční metodou TIG, z důvodu omezení možného pohybu vzorků vůči sobě, ani upínací přípravek (obr. 44) není jinak schopný polohu udržet.

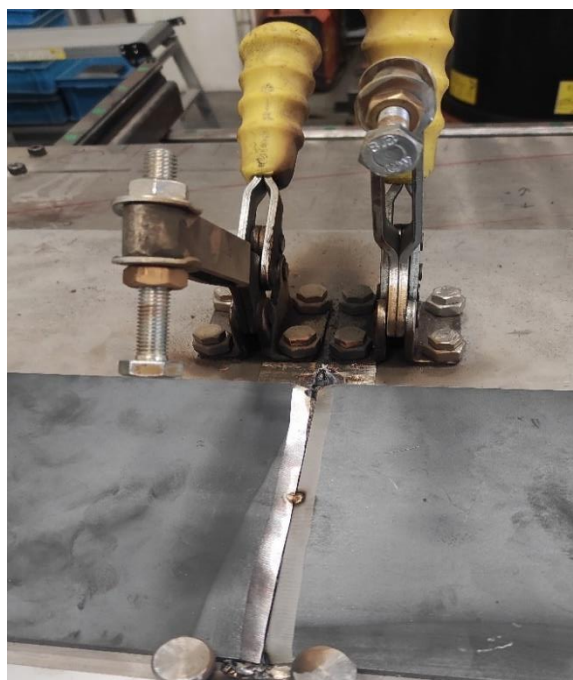
První vzorek byl založen do přípravku, nastaveny doporučené parametry svařování a svařen.

Pozorovanou skutečností byl vývin zplodin při vlastním procesu svařování. Díky tomu byla určena první iterace polohy odsávací hubice.

Pokusné odsávací zařízení bylo realizováno za pomoci původního odsávacího systému obsaženého ve svařovací buňce. Na odtahový systém byla přes připravenou redukci připevněna odsávací hadice. Upnutí hadice na

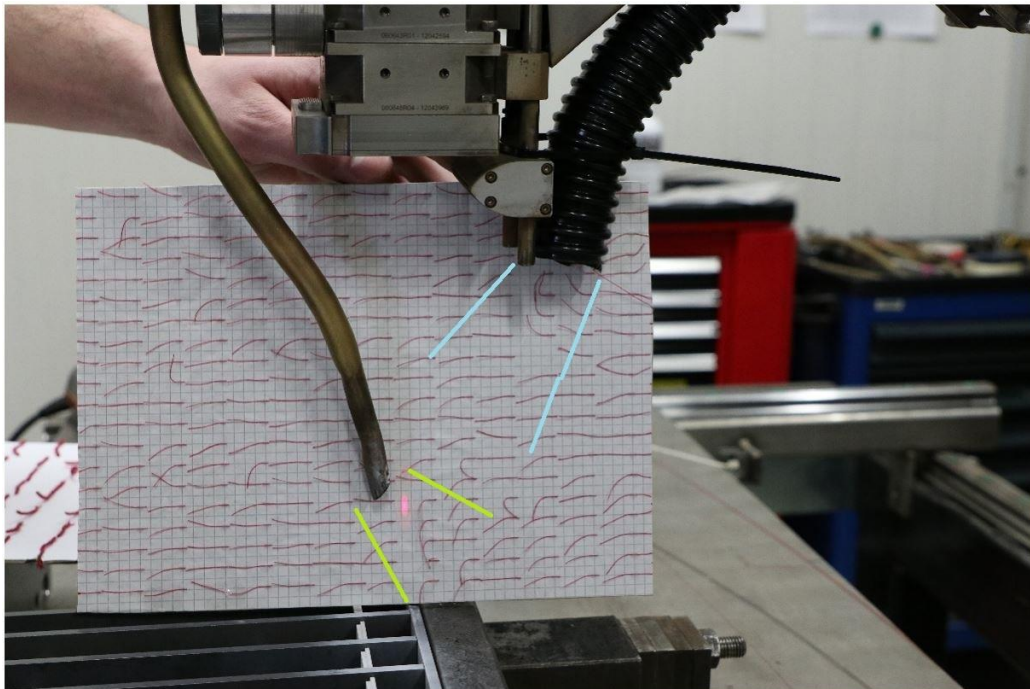


Obr. 43 Návrh vzorků



Obr. 44 Upínací přípravek

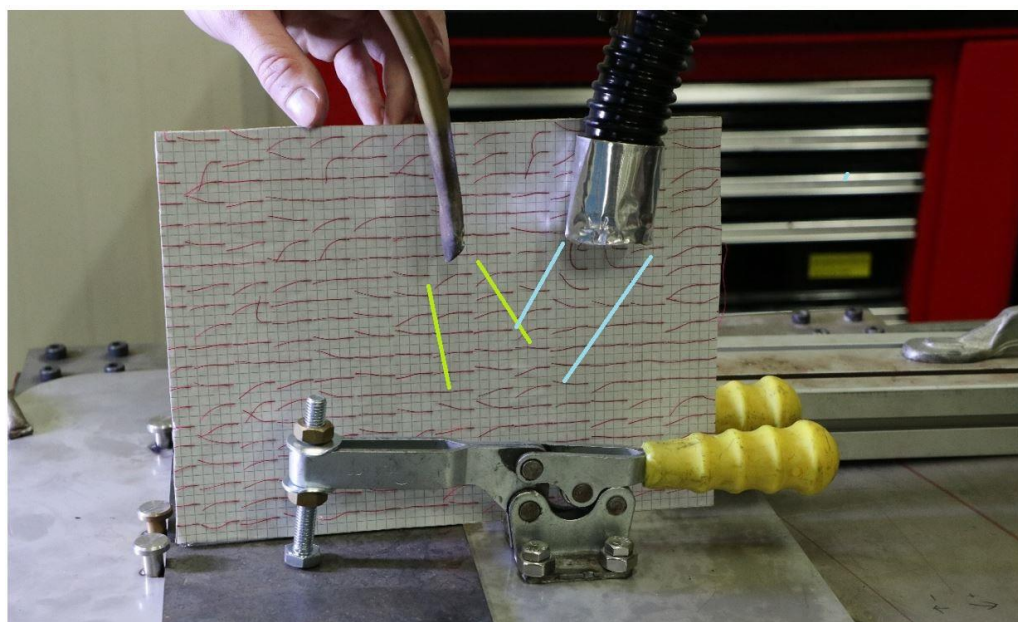
pohyblivou část robota vycházelo z požadavku nijak neomezit jeho mobilitu. Odsávací hadice byla upnuta na laserovou hlavu jak je vidět na obr. 45. Pro pomoc s vizualizací proudění vzduchu byla použita provizorní metoda nit'ových sond. Byla použita příkladací deska s bavlnkami a nitěmi, nitky dlouhé asi 20 mm se ukázaly být jako vhodné pro pomoc se



Obr. 45 Použití metody nit'ových sond pro první případ

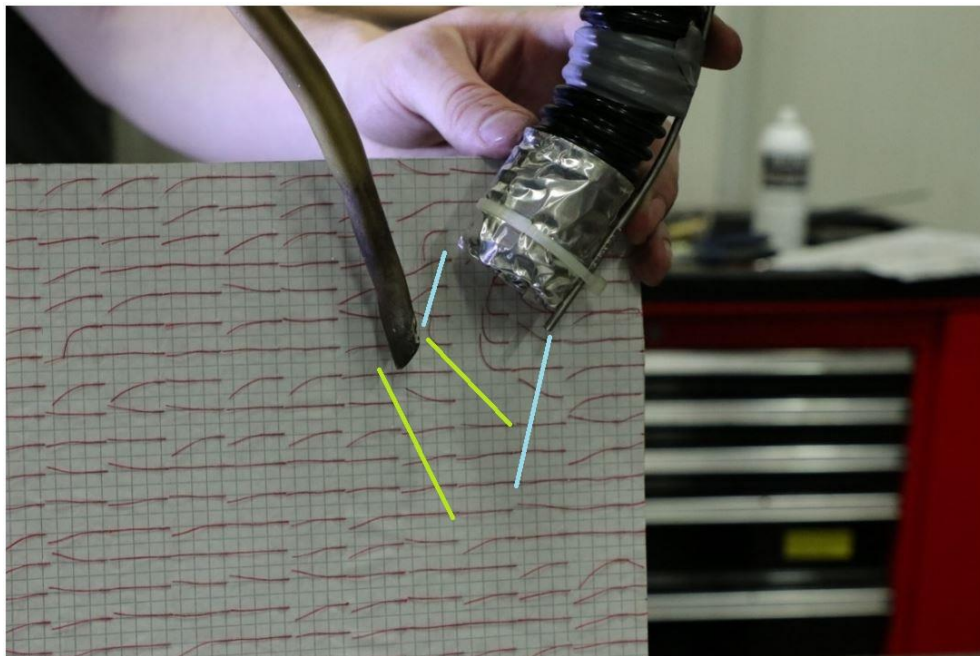
zobrazením.

Následně proběhl druhý svařovací pokus, tentokrát se spuštěným odsávacím systémem. Parametry svařování a samotný průběh byl zaznamenán. Odsávání zplodin s danou polohou hubice se ukázalo jako funkční, v dalším kroku byla upravena pozice hubice pro zlepšení účinku.



Obr. 46 Použití metody nit'ových sond pro druhý případ

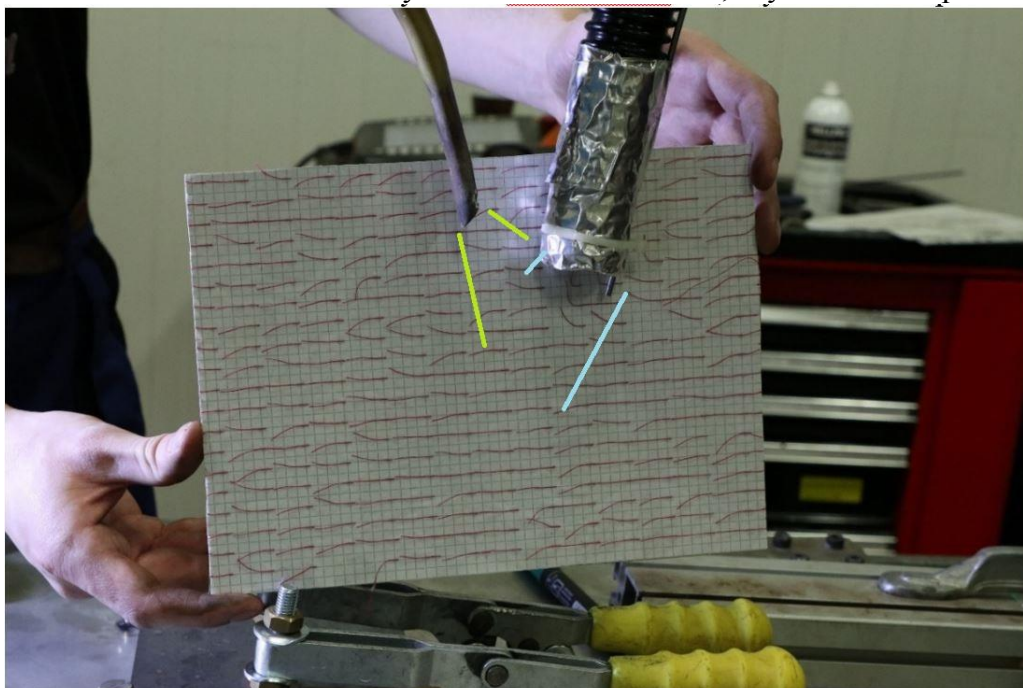
Pro další vzorek (3) bylo umístění hubice upraveno jejím posunutím asi o 100 mm blíže ke svarové lázni. Opět byla provedena jednoduchá vizualizace proudění a zopakován svařovací proces. Hodnoty byly zaznamenány.



Obr. 47 Použití metody nit'ových sond pro třetí případ

Pro 4. vzorek byla hubice ponechána ve stejné vzdálenosti jako v předchozím, pozice byla lehce upravena přitažením pomocí tvarovatelného drátu asi o 30 mm nakloněním ústí hubice blíže k přívodu ochranného plynu, jak je vidět na obr. 48.

Pro vzorek č.5 byla hubice přisunuta o 150mm blíž, to odpovídá vzdálenosti přibližně 50mm od svarové lázně. Pozice musela být lehce zkalibrována tak, aby odsávání nepřekáželo upínači.



Obr. 48 Použití metody nit'ových sond pro čtvrtý případ

Pro demonstraci skutečných podmínek byla provedena další část experimentu: Svařování konkrétního roštu. Pro svařování roštu na laserovém pracovišti byl navržen základací přípravek, ten byl umístěn na jeden z polohovatelných stolů. Pro vlastní proces svařování roštu byl připraven program pohybu robota a svařovacích parametrů.

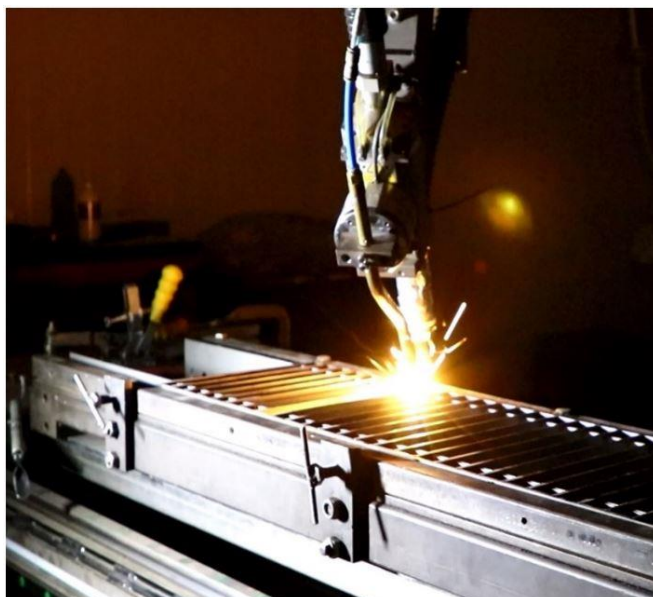
Při prvním svařování nebylo spuštěno odsávání v žádné poloze, při svařování docházelo k výraznému vývinu zplodin, jak je vidět na obr 49. Následně byl rošt zrcadlově otočen a celý proces opakován za přesně stejných podmínek, s výjimkou zapnutého odsávacího zařízení.

Z pokusů provedených na vzorcích plechu byla na místě orientačně určena nejvhodnější pozice umístění odsávací hubice. Jedná se o variantu použitou při svařování zorku č. 3, tedy tak, že ústí odsávací hubice je vzdálenosti přibližně 100 mm od svarové lázně, směřující na ohnisko, bez naklonění k přívodu ochranného plynu. S takto umístěnou hubicí a zapnutým odsáváním bylo provedeno svaření druhé poloviny roštu. (zrcadlově stejné jako v předchozím pokusu). Na obr. 50 je jasně vidět vliv odsávací hubice, zplodiny byly z velké části eliminovány.

Vyrobené plechové vzorky byly převezeny na ÚPT AV ČR k přípravě na experimenty k ověření vlastností vytvořených svarů. K těmto účelům bylo navrženo ověření tahovou zkouškou a metalografickými výbrusy. V tabulce 8. jsou shrnuty proměnné parametry provedeného experimentu. Fotografie vytvořených svarů ukazuje tabulka 9.



Obr. 49 Svařování bez odsávání








Obr. 50 Svařování s odsáváním

Tab. 8 Parametry odsávání

č. experimentu	1	2	3	4	5
stav odsávání	bez odsávání	200 mm od lázně	100 mm od lázně	100 mm od lázně, přikloněno	50 mm od lázně

Tabulka 9 Přehled provedených svarů

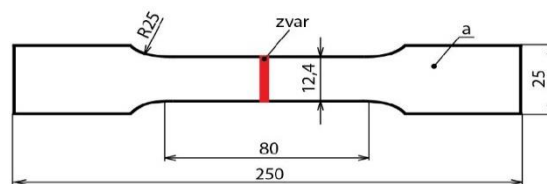
č.e.	fotografie	č.e.	fotografie
1		2	
3		4	
5			

6.2.1 Tahová zkouška I. [14]

Zkouška tahem slouží k určení mechanických charakteristik zkoumaného materiálu při statickém způsobu zatěžování. Získané hodnoty dále slouží k vyhodnocení jakosti materiálu, případně k obecnému posouzení jejich vhodnosti pro určité technologické operace. Jde o nejpoužívanější zkoušku po hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Podstata spočívá v zatěžování zkušební tělesa v jednom směru, což vede ke vzniku jednoosé tahové napjatosti. Dochází k deformaci a přetržení vzorku. Získané hodnoty jsou průběžně zaznamenávány a následně se vyhodnocují.

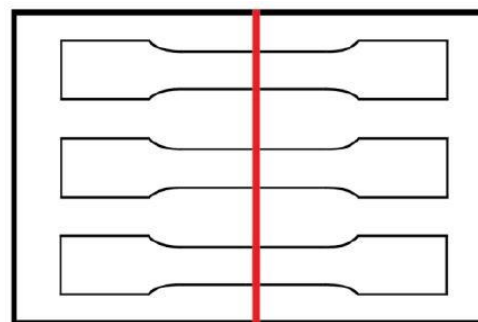
Zkušební tělesa mají normalizované rozměry, nejčastěji kruhového, nebo obdélníkového průřezu. Rozměry vzorku pro zkoušení svarového spoje jsou na obr. 51.

Příprava vzorků pro příčnou tahovou zkoušku proběhla na ÚPT AV ČR. Jednotlivá zkušební tělesa byla vyřezána ze svařených vzorků laserem, pro každý spoj byla vyrobena 3 tahová tělesa, jak znázorňuje obr. 52.

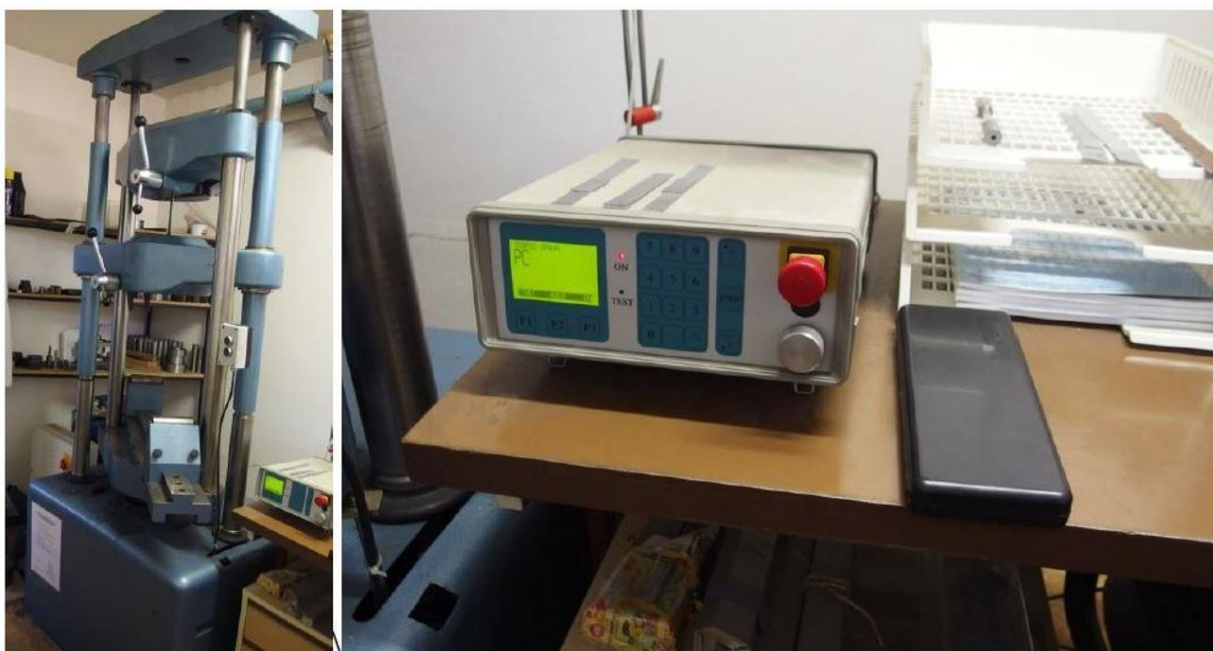


Obr. 51 Rozměry zkušební tělesa

Vlastní tahová zkouška byla provedena na VUT FSI na zkušebním hydraulickém stroji ZD40. Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů maximální možnou silou 400 kN, rychlost zatěžování je nastavitelná. Samotné zařízení je vybavené inkrementálním snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímacím čidlem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Zařízení je připojeno k počítači, přídatný program umožňuje zobrazení výsledků v reálném čase.



Obr. 52 Umístění vzorků



Obr. 53 Zkušební zařízení

Technické parametry zkušebního zařízení:

- Výrobce: HBM/SRN
- Tolerance měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu
- třída přesnosti: 1
- měřící rozsah dráhy: 0-280 mm
- chyba odměřování dráhy: $\pm 0,01$ mm

Vzorky z experimentu byly vyhodnoceny následovně: Z důvodu malého průvaru (řádově 1/5 tloušťky základního materiálu) byla pevnost provedených spojů velmi nízká. K porušení vzorků došlo krátce po upnutí, při začátku působení zatěžovací síly. Nutná síla na porušení jednotlivých vzorků shrnuje tabulka 10.

Tabulka 10 Síla pro porušení vzorků

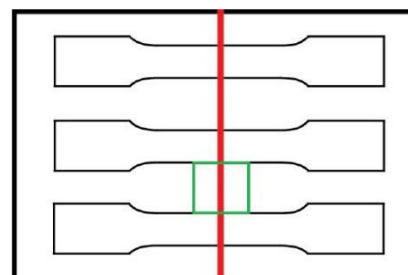
č. vzorku	1	2	3	4	5
síla při porušení [kN]	2,5	3	2,2	3,5	4
odpovídající napětí [Mpa]	43,1	51,7	37,9	60,3	68,9

Z výsledků je patrné, že případná pevnost svarových spojů byla velmi nízká. Značně kolísající hodnoty síly při porušení nemají hodnotu schopnou vypovědět o srovnání

jednotlivých pokusů. K porušení některých vzorků došlo v některých případech ještě před upnutím do čelistí zkušebního stroje, u některých vzorků došlo vlivem svařování k malému prohnutí a následné narovnání při tahové zkoušce tedy navíc působilo v podstatě ohybem. U žádného z provedených vzorků nelze mluvit o tahové zkoušce jako takové, použitelnou informací byl vzhled lomové plochy svarů. Výstupem pokusu bylo doporučení na zvýšení pevnosti svarů.

6.2.2 Vyhodnocení makrostruktury I. []

Pro zhotovení hodnocení makrostruktury musí být ze zkušebních svarů připraveny vzorky. Spolu se vzorky pro tahovou zkoušku byly vyřezány ze zkušebně svařených plechů, umístění výřezů je znázorněno na obr. 54. Další příprava a vyhotovení bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademii věd České republiky.



Obr. 54 Umístění vzorků

Preparace vzorku proběhla vyřezáním řezným kotoučem úhlovou bruskou. U použitého typu dělení materiálu dochází k tepelnému ovlivnění, všechny vzorky byly z toho důvodu následně přeřezány metalografickou pilou, která zajišťuje chlazení dobré chlazení, takže nehrozí riziko přehřátí. Použitá pila je MIKRON 110 od výrobce MTH, viz obr. 55.



Obr. 55 Metalografická pila

Kromě zajištění odvodu tepla z řezu je nutné řezání malou rychlostí, aby nedošlo k tváření za studena. Další postup přípravy vzorků spočívá v zalití do granulované fenolické pryskyřice (MultiFast) pomocí lisovacího zařízení CitoPress-1 od výrobce Struers, viz obr. 56. Zalévací proces proběhl při teplotě 180°C a tlaku 25 Mpa po dobu 3,5 min, následné chlazení proběhlo za 1,5 min. vzorky byly tímto připraveny k dalšímu procesu.

Takto připravené vzorky byly následně broušeny a leštěny na přístroji Tegramin-20 od výrobce Struers, viz obr.56. Broušení probíhalo s postupnou výměnou brusných disků, se zvyšující se zrnitostí až na hodnotu 600. Dále proběhlo leštění pomocí disků s diamantovou pastou o velikosti zrn 1um.



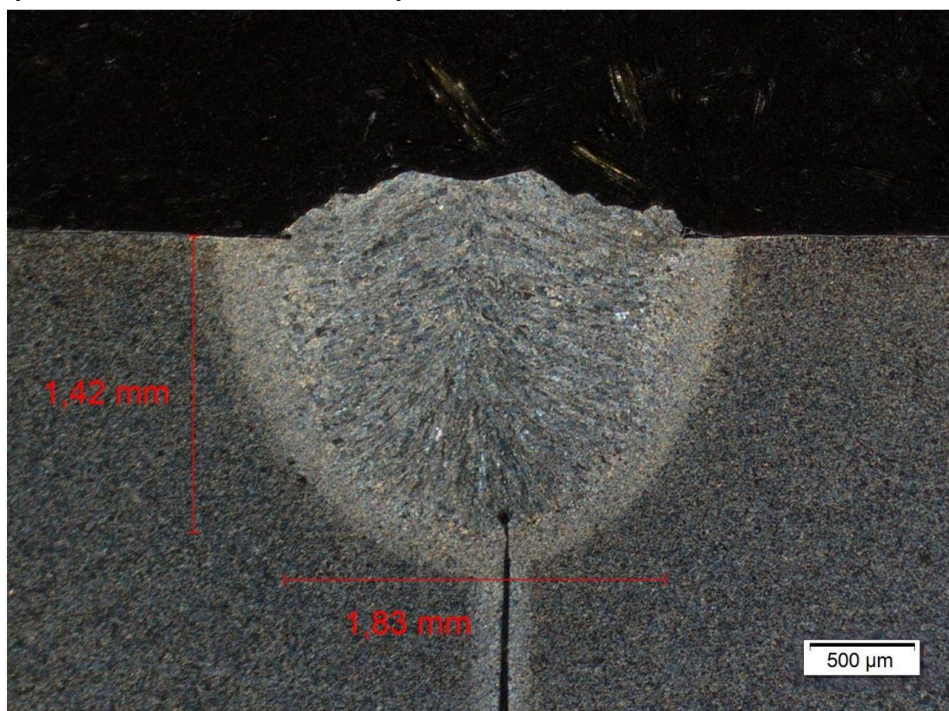
Obr. 56 Lisovací zařízení a metalografická bruska

Finálně vyleštěné a naleptané vzorky byly následně pozorovány pod mikroskopem vybaveným kamerovým systémem a možností přímého převodu obrazu do digitální podoby, viz obr. 57. Díky připojení k počítači bylo možné v reálném čase upravovat polohu vzorků, provádět detailní zkoumání a přímo pořizovat fotodokumentaci. Z fotografických snímků je patrná poměrně velká tepelně ovlivněná oblast svarového spoje. Žádný ze vzorků nebyl provařen až do vzniku kořene svaru. Takové svary jsou typické právě pro metodu svařování laserem v kondukčním režimu.

Na obr. 58 je znázorněn makroskopický snímek vzorku č. 1, který byl svařen laserem bez použití odsávání. Rychlost svařování byla v tomto případě 20 mm/s. Šířka svarového kovu u daného vzorku činí v horní oblasti 1,83 mm a směrem do materiálu se charakteristicky zmenšuje. Směrem ven z materiálu je svar převýšený přibližně o 0,25 mm, směrem do materiálu není provařený, nedošlo k vytvoření kořene. Velikost tepelně ovlivněné oblasti činí přibližně 0,2 mm. Kondukčním režimem svařování bylo dosaženo hloubky průvaru 1,42 mm, což odpovídá přibližně třetině tloušťky svařovaného vzorku. Tvar svaru i tepelně ovlivněné oblasti je symetrický, svar je vůči poloze plechů posunutý o 0,2 mm k jedné straně. Hranice mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem jsou dobře rozeznatelné, ale přechody nejsou vyloženy ostré. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna a nejsou zde pozorovány žádné viditelné svarové vady.



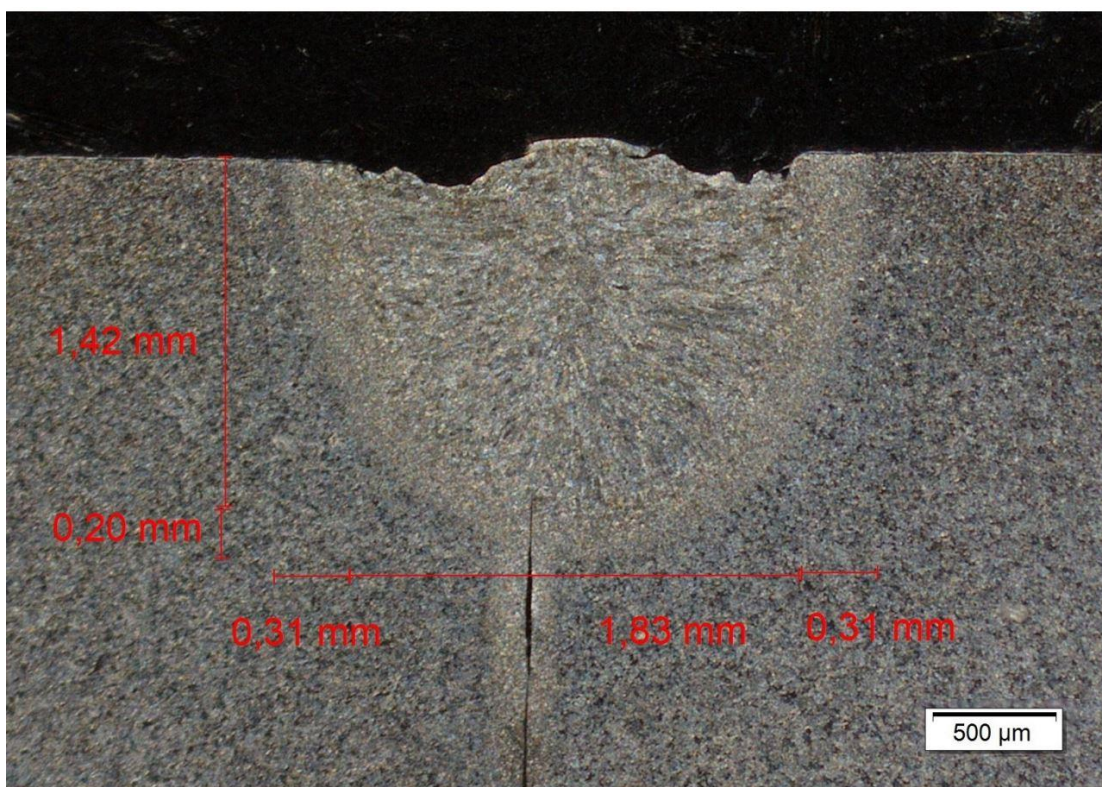
Obr. 57 Mikroskop s fotoaparátem



Obr. 58 Snímek vzorku č.1

Makroskopický snímek vzorku č. 2, který byl svařen s odsáváním ve vzdálenosti přibližně 200mm od svarové lázně se nijak výrazně neliší od vzorku č. 1. Rychlost svařování byla i v tomto případě 20 mm/s. Šířka svarového kovu v horní oblasti je 1,8 mm a směrem ven z materiálu je svar převýšený přibližně o 0,2 mm, směrem do materiálu není provařený, nedošlo k vytvoření kořene. Velikost tepelně ovlivněné oblasti činí přibližně 0,2 mm. Hloubka průvaru 1,40 mm. Tvar svaru i tepelně ovlivněné oblasti je symetrický, svar je vůči poloze plechů umístěný rovněž symetricky. Ve struktuře není znát výrazné zhrubnutí zrna a nejsou zde žádné viditelné svarové vady.

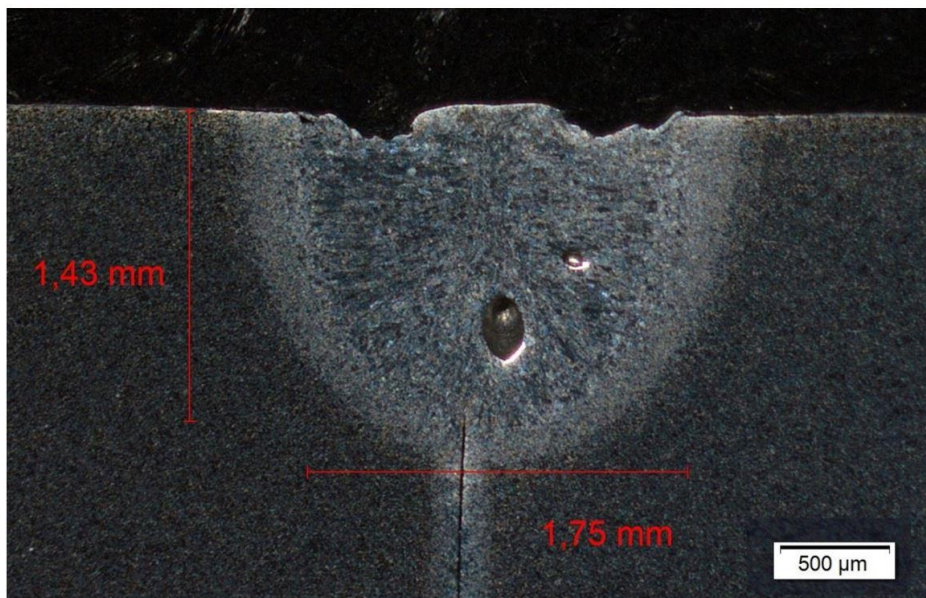
Makroskopický snímek vzorku 3 je na obr. 59. Vzorek byl svařen laserem s odsáváním ve vzdálenosti přibližně 100 mm od svarové lázně. Rychlost svařování byla opět 20 mm/s. Šířka svarového kovu zde činí v horní části 1,83 mm a směrem do materiálu se zmenšuje stejným způsobem jako v předešlých případech. Okraje svaru jsou směrem z materiálu asi o 0,1mm propadlé, směrem do materiálu není provařený, nedošlo k vytvoření kořene. Velikost tepelně ovlivněné oblasti činí přibližně 0,2 mm ve spodní oblasti, směrem do základního materiálu až 0,31 mm. Bylo dosaženo hloubky průvaru 1,42 mm, což odpovídá asi 0,3 tloušťky svařovaného vzorku. Tvar svaru i tepelně ovlivněné oblasti je i v tomto případě symetrický, svar je vůči poloze plechů posunutý cca o 0,3mm k jedné straně. Hranice základního materiálu, tepelně ovlivněné oblastí a svarového kovu jsou dobře rozeznatelné, přechody nejsou vyloženě ostré. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna a nejsou zde žádné viditelné svarové vady.



Obr. 59 Snímek vzorku č. 3

Na snímku na obr. 60. je vidět svar vzorku č. 4. Odsávání bylo v tomto případě umístěno do vzdálenosti 100 mm od svarové lázně, ale konec hubice byl natočen více směrem k přívodu ochranného plynu. Ostatní parametry byly stejné jako v předešlých případech. Povrch svaru je v okrajové oblasti mírně propadlý, směrem do materiálu činí průvar 1,43 mm, v nejširším místě svar dosahuje 1,75 mm. Tvar tepelně ovlivněné oblasti je symetrický, svar je vytvořen

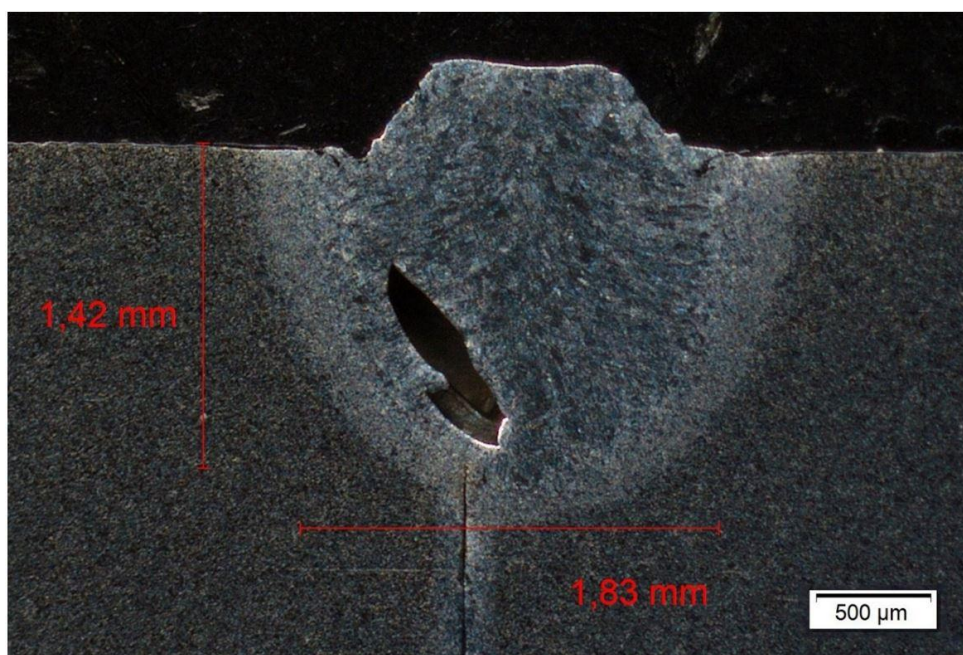
o 0,15 mm ke straně. Hranice základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu jsou dobře rozeznatelné, přechody nejsou vyloženě ostré. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna, v oblasti svarového kovu jsou patrné póry, větší o rozměrech 0,2 x 0,1 mm.



Snímek na obr. 61 zobrazuje vzorek č. 5. Odsávání bylo v tomto případě nejbližše svarové

Obr. 60 Snímek vzorku č. 4

lázni, přibližně ve vzdálenosti 50mm od ní. Vrchní část svaru je o 0,35 mm převýšená, jedná se zřejmě o místí převýšení způsobené mimo jiné bublinou ve spodní části svaru a vynesením vzniklého nadbytku svarového kovu. Šířka svaru je ve vrchní části 1,83 mm.



Obr. 61 Snímek vzorku č. 5

6.3 Experiment II [9]







Z provedených zkoušek byly převzaty informace nutné pro úpravu svařovacího procesu. Na základě výsledků tahové zkoušky a metalografie byly navrženy nové svařovací parametry a poloha odsávací hubice. Z výsledků metalografie vyplývá, že umístění hubice a odtah zplodin neměl negativní vliv na proudění ochranné atmosféry v žádném z testovaných poloh, kromě 5. To znamená, že v daných případech nedošlo ke zhoršení kvality svarového spoje a navržená poloha odsávacího systému je přijatelná.

Na základě této informace byl ve firmě proveden druhý experiment. Z důvodu výrazně odlišných parametrů svařování při druhém experimentu (rychlost svařování) byly provedeny vzorky následovně: Poloha odsávací hadice byla ustanovena do optimální pozice, při výrobě vzorků se jednalo vždy o provedení svaru s upravenými parametry svařování a vypnutým/zapnutým odsáváním. Metodiku experimentu ukazuje tabulka (tab.11), fotografie svaru tab. 12

Tabulka 11 Parametry experimentu

vzorek č.	1	2	3	4	5	6
rychlost [mm.s^{-1}]	5	4	3	3	4	5
odsávání	ano	ano	ano	ne	ne	ne

Tabulka 12 Fotografie vytvořených svarů

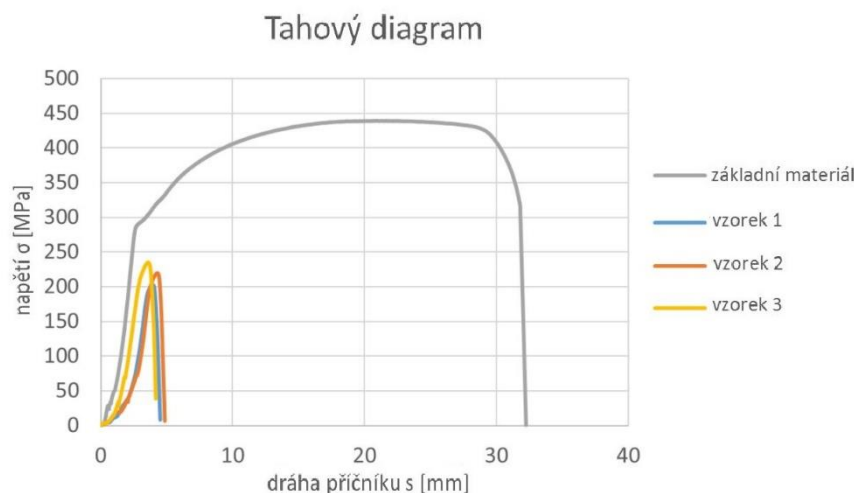
č.v.	fotografie	č.v.	fotografie
1		2	
3		4	
5		6	

Vizuálním srovnáním vzorků plechu bylo zaznamenáno, že plechy použité v druhém experimentu měly výrazně čistší povrch. Během druhého pokusu bylo tedy navíc navrženo provést před samotným svařováním očištění povrchu plechu od okují. Povrch byl tedy obroušen brusným papírem do kovově čistého lesku. Při následném svařování téměř nedocházelo k vývinu dýmu. Použitá úprava povrchu ale nepřichází v podmínkách průmyslové výroby v úvahu, náročnost provádění operace čištění je značně neekonomická. Experiment pouze prakticky poukázal na přímý vliv povrchové vrstvy plechu, na základě toho bylo navrženo analyzovat chemické složení povrchu. K tomu byla použita speciální metoda elektronové mikroskopie, EDX.

6.3.1 Tahová zkouška II [14,28]

Na základě informací zjištěných z první tahové zkoušky a vyhodnocení metalografických výbrusů svarových spojů byl po konzultaci s technologem ve firmě ACO Industries navržen druhý experiment. Opět byly připraveny vzorky pro svaření, a upraveny parametry svařování. Díky informacím z prvního experimentu byla pro druhý pokus určena vhodná poloha odsávací hubice, spočívající v jejím umístění cca 100 mm od svarového kovu. Svařovací parametry vzorků ukazují tab. 13

vzorek	1	2	3	4	5	6
rychlost	5	4	3	3	4	5
odsávání	ano	ano	ano	ne	ne	ne



Obr. 62 Snímek vzorku č. 5

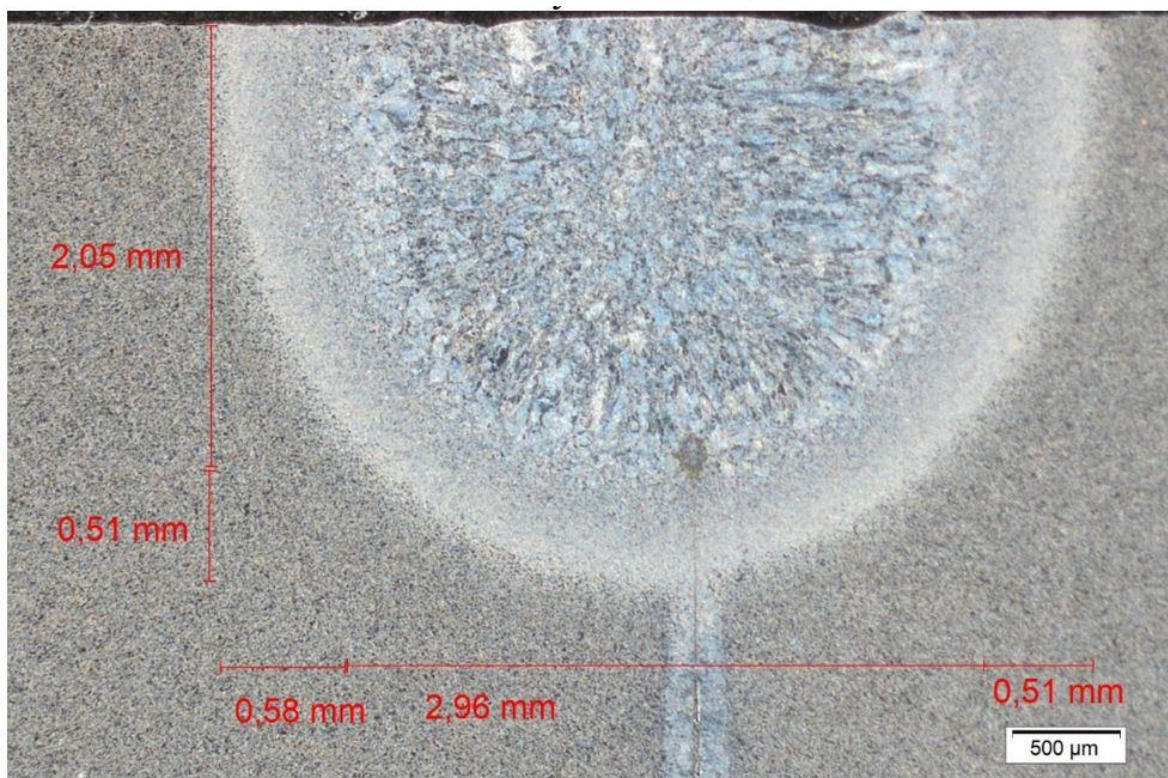
Z tahových diagramů naměřených vzorků vyplývá, že svary nedosahují pevnosti svařovaného materiálu. Vyhodnocené parametry uvádí tab. 14. Ze zjištěných hodnot je zřejmý vliv svařovací rychlosti, která byla při druhém experimentu proměnná. Z naměřených hodnot tahové zkoušky vyplývá, že přídatné odsávací zařízení nemělo ani v jednom případě znatelný vliv na pevnost svaru. Závěrem tahové zkoušky tedy je, že odsávání může být použito.

Tabulka 14 Výsledky tahové zkoušky

vzorek č.	1	2	3	4	5	6
F max	200	220	240	238	220	200
Rm	1,22	1,32	1,39	1,38	1,32	1,22

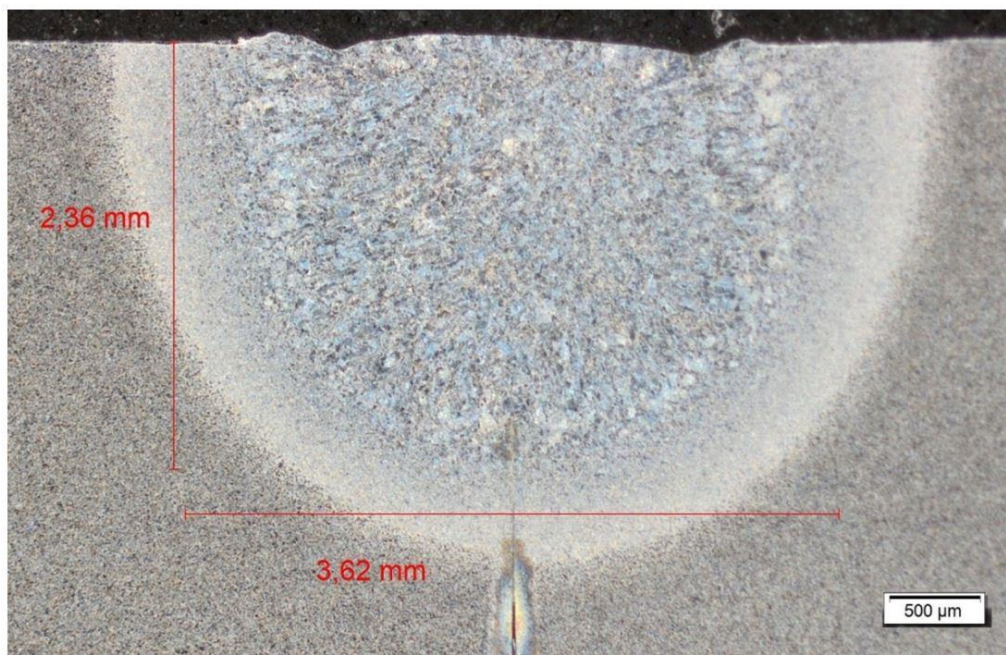
6.3.2 Makrostruktura II. []

Na obr. 63 je znázorněn makroskopický snímek vzorku 1B, který byl svařen laserem s použitím odsávání dle vyhodnocené optimální vzdálenosti, tj. přibližně 100 mm od svarové lázně. Rychlost svařování byla upravena na hodnotu 5 mm/s. Šířka svarového kovu u daného vzorku činí v horní oblasti 2,96 mm, což odpovídá přibližně 1,6 násobku velikosti svru v předchozím experimentu. Směrem do materiálu se zmenšuje stejným způsobem. Svar není převýšený, směrem do materiálu ani v tomto případě nedošlo k provaření kořene. Velikost tepelně ovlivněné oblasti činí přibližně 0,58 mm. Díky výrazně nižší rychlosti bylo dosaženo hloubky průvaru 2,05 mm, což odpovídá asi 0,4 tloušťky svařovaného vzorku. Tvar svaru i tepelně ovlivněné oblasti je symetrický, svar je vůči poloze plechů posunutý o 0,25 mm k jedné straně. Hranice mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem jsou dobře rozeznatelné, přechody nejsou vyloženy ostré. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna ani žádné viditelné svarové vady.



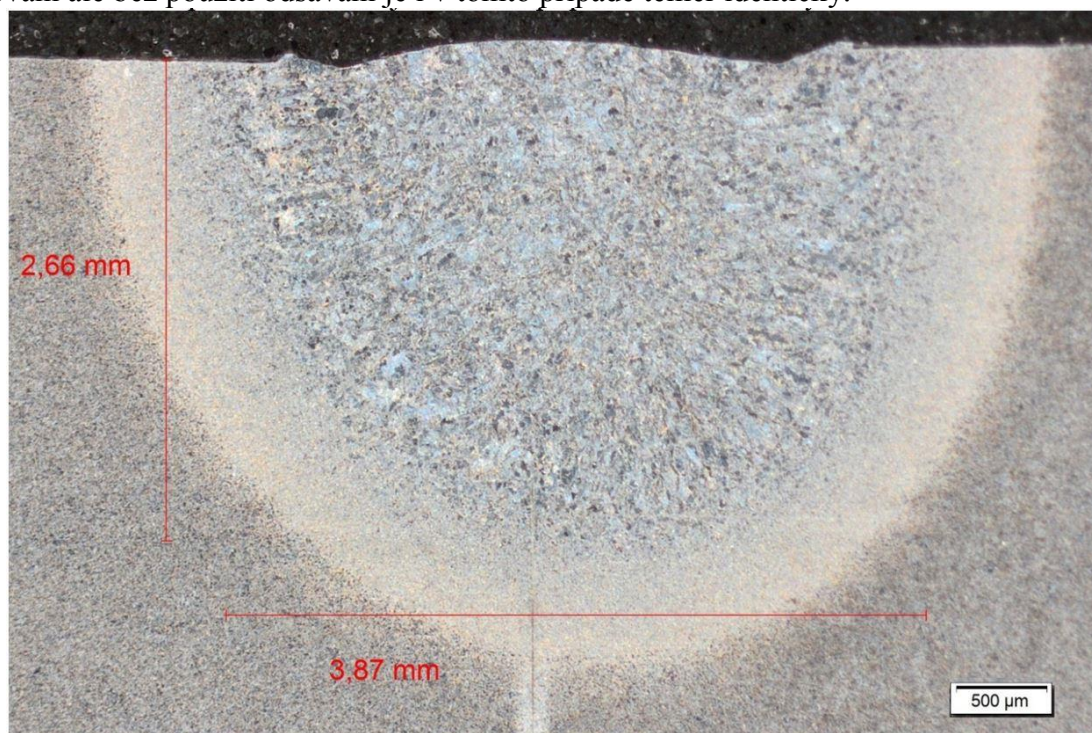
Obr. 63 Snímek vzorku 1B

Obr. 64 znázorňuje výbrus vzorku č. 2B, který byl svařovaný rychlostí 4 mm/sec. Morfologie svaru je shodná s předchozími případy, patrný je vliv nižší svařovací rychlosti, díky které svar dosahuje v horní části šířky 3,62 mm a hloubky provaření 2,36 mm. Velikost tepelně ovlivněné oblasti ve spodní části je 0,33 mm, po stranách svaru potom 0,45 mm. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna ani svarové vady. Výbrus vzorku se stejnou rychlostí svařování ale bez použití odsávání opět odpovídá.



Obr. 64 Snímek vzorku 2B

Na obrázku č. 65 je znázorněn výbrus vzorku č. 3B, který byl svařovaný rychlostí 4 mm/sec. Morfologie svaru je shodná s předchozími případy, patrný je vliv nižší svařovací rychlosti, díky které svar dosahuje v horní části šířky 3,87 mm a hloubky provaření 2,66 mm. Velikost tepelně ovlivněné oblasti ve spodní části je 0,36 mm, po stranách svaru potom 0,48 mm. Na snímku není znát výrazné zhrubnutí zrna ani svarové vady. Výbrus vzorku se stejnou rychlostí svařování ale bez použití odsávání je i v tomto případě téměř identický.

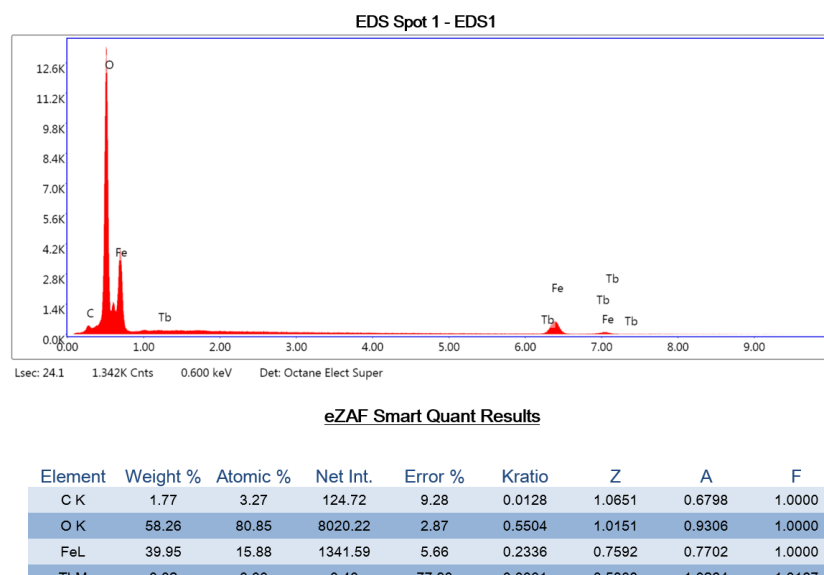


Obr. 65 Snímek vzorku č. 3B

Jak bylo výše popsáno, všechny vzorky jsou bez viditelných vad. Díky tomu se dá prohlásit, že navržená pozice odsávacího zařízení nemá negativní vliv na kvalitu svaru. Odsávací vliv na vytvořené zplodiny je značný, konkrétní návrh odsávání se dá označit za funkční. Svařovací parametry navržené pro druhý experiment se zásluhou informací získaných z prvního pokusu ukázaly jako vhodné. Na snímcích metalografických výbrusů ze druhého experimentu je poměrně výstižně vidět vliv rychlosti svařování na velikost výsledného spoje. Metalografické výbrusy vzorků, u kterých nebylo použito odsávání, jsou ve všech případech srovnatelné s výbrusy vzorků s použitým odsáváním, což potvrzuje myšlenku, že testovaný návrh odsávání nepůsobuje zhoršení kvality svaru a může být použit.

6.3.3 Analýza povrchu EDX []

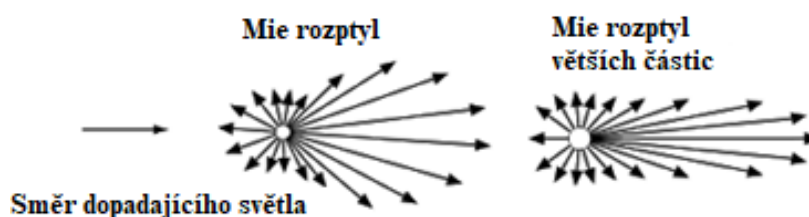
Energiově-Disperzní mikroanalýza EDX je metoda k určení chemického složení vzorku. Princip metody spočívá v interakci záření se vzorkem, přesnější metodika byla definována v kapitole XX. Analýza proběhla na ÚPT AV ČR, je dostupná jako doplněk elektronového mikroskopu. Výstupem měření jsou data zobrazená na obr. 66.



Obr. 66 Výstupní data analýzy EDX

Z analýzy vyplývá, že část objemu povrchové vrstvy tvoří oxidy železa. Z prostého poměru vyplývá, že se nejedná ani o FeO, ani Fe₂O₃, ale jejich směs. Pro přesné určení jejich poměru bylo nutné více analýz.

Důležitým faktem je, že při svařování dochází k ohřevu povrchové vrstvy a tedy i přítomných oxidů. V případě laserového svařování se jedná o velmi vysoké teploty. Zahřátím oxidů dochází k jejich rozpadu, probíhající děje jsou poměrně složité, triviálním výsledkem zmíněných procesů je uvolňování velkého množství drobných částic ve formě dýmu. Částice mají na laserový svazek negativní vliv, neboť s ním přímo interaguje. Dochází k rozptylu záření, uplatňuje se zde mimo jiné Mieův efekt (angl. Mie scattering), v principu jde o to, že když světlo zasáhne částice suspendované ve vzduchu, rozptýlí se, jak je vidět na obrázku 67. Z důvodu dynamického chování částic se



Obr. 67 Mieův efekt rozptylu záření

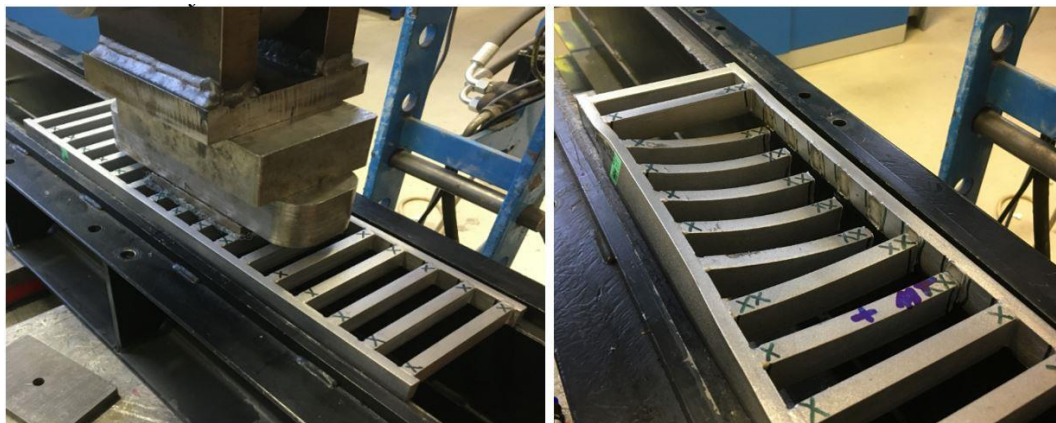
jedná o proces doprovázený náhodnými jevy. Důsledkem toho je kolísání intenzity dopadu laserového svazku na svařovaný povrch. Kolísání je v řádu jednotek procent. Praktickým závěrem tedy je, že odsávání částic vzniklých v podobě dýmu by mělo vést ke stabilnějšímu svařovacímu procesu díky minimalizaci náhodných jevů způsobených rozptylem svazku a ke zvýšení účinnosti. Proces odsávání zplodin ale nesmí narušit proudění ochranné atmosféry.

6.4 Vyhodnocení svarových spojů podle metodiky ACO [9]

Jak z vyplývá z vyhodnocených dat tahových zkoušek, žádný z vytvořených vzorků nedosahuje dostatečné pevnosti na to, aby se dal považovat za pevnostní svar. O použití takového spoje prakticky dále rozhoduje vhodnost k použití výrobku k určeným účelům. Hodnoceným roštem je U94494, jedná se o zákaznický tip pro USA, určený pro venkovní odvodnění. Testování roštu svařovaného dosavadní metodou MAG bylo zhotoveno v USA podle amerických norem, ve výrobě v Příbyslavi bohužel nejsou protokoly zkoušek ani jiné konkrétní podklady k dispozici.

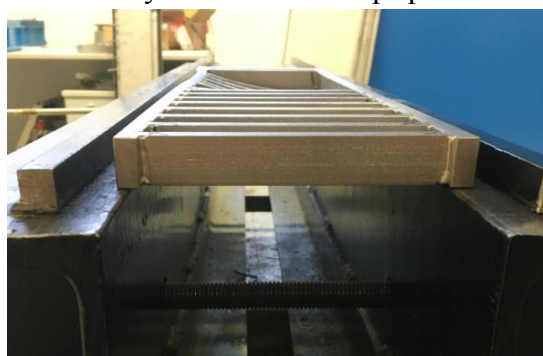
V české republice přístup ke zkoumání vlastností roštu blíže určují normy ČSN EN 1253 Podlahové vpusti a střešní vtoky, ČSN EN 1433 Odvodňovací žlábkové pro dopravní a pěší plochy - Klasifikace, konstrukční zásady, zkoušení, označování a hodnocení shody a ČSN EN 124 Poklopy a vtokové mříže pro dopravní plochy. Firma ACO Industries se v případě požadavku podle uvedených norem řídí. Výsledkem testování roštů je protokol o zkoušce. Metodika zkoušky je uvedena dále. Zkoušeným roštem není U94494, ale Z380313_PR, který konstrukčním typem odpovídá roštu řešenému v diplomové práci.

V případě požadavku na ověření užitných vlastností roštu, konkrétně jeho únosnosti, je prováděna následující zkouška.



Obr. 68 Testovací zařízení

Rošty jsou v závislosti na konstrukční specifikaci uloženy do zkušebního přípravku lisu. Předmětem zkoušky je simulace reálných podmínek, z toho důvodu musí být rošt uložen tak, jak je navržený. Uložení může být realizováno více způsoby, z hlediska únosnosti a možného zatěžování se jedná o uložení, při kterém je dosedací plochou v případném žlabu pouze rámeček žlabu, jednotlivé příčky nejsou v přímém kontaktu s dosedací plochou, jak je vidět na obr. 69. V druhém případě dochází k dosednutí jak rámečku, tak jednotlivých výplňových příček. Rošt je následně zatížen dle



Obr. 69 Uložení roštu

metodiky ČSN EN 1433 a ČSN EN 1253, tvar razníku se řídí požadavky pro konkrétní zátěžovou třídu, tvar razníku pro zátěžovou třídu C250. K vyhodnocení výsledku se používá lis s tenzometrickým snímačem síly a displejem. Zatěžování probíhá do doby, než dojde k deformaci roštu.

Ze zjištěných hodnot je vyvozeno hodnocení kvality, v potaz je brána vizuální kontrola svarů. Konkrétní výsledky testů roštu ukazuje tabulka 15.

Tabulka 15 Výsledky testování roštů

KS	PÓR VE SVÁRU	CHYBA SVÁRU	% SVÁRŮ NOK
1	0	1	1%
2	0	2	3%
3	2	0	0%
CELKEM	2	3	1%

Závěrem testování je rozhodnutí, zda rošt vydržel požadované zatížení i při případných nalezených svarových vadách. V případě že ne, je dalším postupem zkoumání únosnosti konstrukce a druhu uložení a kvality svarového spoje. V tomto konkrétním případě rošt vydržel požadované zatížení C250 i přes uvedené 1% NOK svarů. V případě uložení pouze za dosecí rámeček došlo k destrukci při síle 19 tun, deformovaný rošt je na obr. 70.



Obr. 70 Rošt po zkoušce

Konstrukce roštu U94494 a návrh uložení je takový, že svar není hlavním nosným prvkem konstrukce, zatížený rošt nemá podepřený jen vnější rámeček, ale i jednotlivé konce příček. Majoritní část síly působící na příčku se tak přímo přenesou do dosedové hrany žlabu.

Z tohoto předpokladu lze vyvodit, že i konkrétní provedené svary, které byly tahovou zkouškou vyhodnoceny jako nepevnostní, budou dostatečné pro dodržení užitných vlastností roštu. Předpoklad bude ověřen popsanou zkouškou zatížení v ACO Industries podle příslušných norem.

6.5 Vlastní návrh odsávání [9,12]

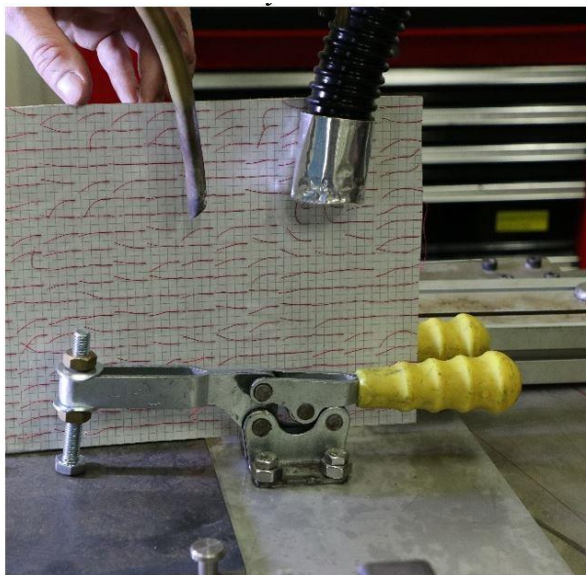
Jak již bylo uvedeno, realizace odsávacího systému je důležitá z důvodu ochrany strojního zařízení před působením částic vzniklých vlastním procesem svařování. Konstrukce pracovního prostoru a obslužných zařízení ve firmě ACO Industries neumožňuje použití centrálního odsávání svařovacího prostoru, takové zařízení by muselo disponovat extrémním výkonem, z důvodu minimalizace času odsávání vzniklých zplodin z celého prostoru buňky před vlastním otevřením portálu sloužícího k výměně a zakládání polotvarů pro svařovací proces.

Přesnou pozici uložení odsávací hubice nejlépe charakterizuje obr. 71, který znázorňuje její uložení použité při pokusu v experimentu I a II. Hubice je od vlastní svarové lázně vzdálena

přibližně 100 mm a ve vertikálním směru lehce odchýlena od uložení přímo nad ohnisko. Zmíněnou konfigurací bylo v obou experimentech dosaženo nejlepších výsledků.

Působením zdraví nebezpečných látek obsažených ve vzniklém dýmu má dopad na zdraví obsluhy a tím na bezpečnost práce. Z důvodu minimalizace náročnosti zavedení přídatného odsávacího zařízení do procesu svařování byla od začátku snaha vyhnout se mechanickému pohybu tohoto odsávání. Díky charakteru laserového robotického svařování vysokým stupněm automatizace lze relativně jednoduše uvažovat o napojení ovládní odsavače přímo na řídicí systém pracoviště a proces odsávání tak přímou vazbou spojit s programovým ovládním celého svařovacího procesu.

Díky vazbě je možné systém nazvat jako chytré řízení výkonu, konkrétně například intervalové, tzn. v čase vlastního procesu odsávání pracuje na plný výkon, při prostoji z důvodu otáčení portálu se zakládacími přípravky je odtah funkční pouze na několik málo %. Konkrétní zařazení do procesu je věcí automatizace, praktická realizace spočívá v použití PLC programovatelné jednotky, která se v prostředí průmyslové automatizace a stejně tak některých automatických procesech ve firmě ACO uplatňuje.



Obr. 71 Vhodné odsávání

Vhodná zařízení jsou na obr. 72 a 73. Užité vlastnosti a cenu ve zkratce udává tabulka 16. Jedná se o odsávací zařízení výrobce Plymovent a Kemper.s

Tabulka 16 Vlastnosti odsávacích zařízení

zařízení	Plymovent MonoGo	xFUME VAC PRO
cena	61 756 Kč s DPH	280 500 Kč s DPH
technická data	Napájení: 230 V Příkon: 1,1 kW Odsávací kapacita: 850 m ³ /h Hlučnost: 67 dB	Odsávací výkon 1000 m ³ /h Hmotnost 155 kg Výkon motoru 1,5 kW Napěťová soustava 3 x 400 V / 50 Hz



Obr. 72 Plymovent MonoGo



Obr. 73 xFUME VAC PRO [12]

6.6 Technicko ekonomické zhodnocení [9,12]

Vstupními parametry pro ekonomické zhodnocení procesu jsou celkový čas svařování a cena za hodinu provozu zařízení. Porovnávanými metodami jsou stávající způsob svařování technologií MAG a zkoumaná metoda svařování laserem, se započtením nákladů na pořízení navrhované odsávací jednotky. Konkrétní parametry jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17 Porovnání technologií MAG a laser

	MAG	Laser
Jednotkový čas pracoviště [min]	65	22
Cena za minutu provozu [Kč]	11,2	16,6

Řešený rošt obsahuje celkem 5580 mm svarů. Konstrukce je taková, že jednotlivé svary jsou poměrně krátké a je jich velké množství (celkem 62). Samotný postup svařování spočívá v nabodování jednotlivých příček a následném přivaření. Z toho důvodu obsahuje proces velké množství přejezdů a najíždění na pozice (celkem 124). Celkový čas svařování je daný součtem čistého času svařování a polohování. Zakládání roštu do přípravku probíhá souběžně se svařováním a jeho čas je shodný s časem přípravy roštu pro svařování technologií MAG. Svařovací čas roštu metodou MAG činí 65 min, svařování pomocí laserového svazku 22 min.

Z uvedených hodnot vyplývá, že náklady ušetřené změnou technologie = náklady na svařování metodou MAG - náklady na svařování metodou laser, tedy $(65 \times 11,2) - (22 \times 16,6) = 362 \text{Kč}$.

Započítáním roční produkce roštů lze zjistit předpokládanou dobu návratnosti investice do odsávacího zařízení. Roční produkce činí 400 ks, z toho vyplývá, že ročně dojde k úspoře 144 800 Kč. Tabulka 18 ukazuje porovnání doby návratnosti pro navrhovaná zařízení.

Tabulka 18 Doba návratnosti jednotlivých zařízení

	Plymovent	xFUME VAC PRO
cena	62 000 Kč	280 500 Kč
doba návratnosti	0,5 roku	2 roky

7 ZÁVĚRY [8,9]

Řešeným problémem byl nadměrný vývin dýmu při výrobě roštu určeného pro venkovní odvodňovací systémy. Použitým materiálem je ocel S235JR. Rošt se vyrábí vyřezáním polotovarů z plechu a následným svařováním, které je realizováno metodou MAG. Samotný proces svařování je vyhovující z hlediska kvality svaru a výsledných užitných vlastností výrobku, ale použitím dostupné metody svařování laserem je možné snížit časovou náročnost a zlepšit ekonomičnost výroby. Použití laserové svařovací technologie je podmíněno zajištěním odsávání zplodin, které vznikají při svařovacím procesu.

Dle požadavků na optimalizaci technologie byly provedeny experimenty, při prvním z nich byly zjištěny a ověřeny procesy chování vytvořených zplodin. Výsledky prvního experimentu byly blíže vyhodnoceny pomocí tahové zkoušky a metalografických výbrusů. Díky výsledkům tahové zkoušky a metalografie byly upřesněny parametry pro druhý experiment. Závěrem prvního experimentu bylo hodnocení kvality svarů, která se ukázala jako dobrá, a mechanických vlastností, které byly nedostatečné. Zhodnocením výsledků byla navržena optimální poloha odsávací hubice.

Druhý experiment ve firmě byl zaměřen na zvýšení kvality svarů, s ověřením polohy odsávání. Bylo vyrobeno několik vzorků, které byly následně rovněž podrobeny tahové zkoušce a zhodnocení metalografických výbrusů, navíc byla provedena EDX analýza povrchu plechu s cílem blíže specifikovat původ zplodin tvořených při vlastním procesu svařování. Pevnostní charakteristiky ani ve druhém případě nedosáhly optimálních hodnot, metalografickými výbrusy byla zjištěna dobrá kvalita svarů. Z analýzy povrchu vyplynulo, že povrch je tvořen směsí oxidů FeO a Fe₂O₃. I přes nízkou pevnost vytvořených svarů lze výrobek považovat na použitelný, požadovanou vlastností roštu je totiž celková únosnost, ta je ale v tomto případě daná konstrukcí a uložením. Přesné hodnoty užitných vlastností souvisejících s pevností a zátěžovou třídou určí metodika zkoušení roštů používaná firmou ACO Industries.

Na základě zjištěných výsledků byly navrženy parametry svařování a optimální poloha odsávací hubice. Dle dostupných provedených experimentů jsou doporučené parametry uvedené v tabulce 19.

Tabulka 19 Doporučené svařovací parametry

Výkon	Svařovací rychlost	Průtok plynu	Poloha odsávání
2500 W	5 mm.sec ⁻¹	20 l/min	100 mm od svarové lázně, směřující na ohnisko, viz kap. 6.5, obr 71

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [2]

1. KOHOUT, Jaroslav. *Optimalizace procesu výroby trubek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116661>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
2. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
3. Battleship laser. *Newscientist.com* [online]. New York, 2018 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://images.newscientist.com/wp-content/uploads/2021/02/19111734/18-feb_laser-blaster.jpg
4. Medicine laser. *Cordis.europa.eu* [online]. GB [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/docs/results/images/2015-02/149591.jpg>
5. Úskalí laseru. *Elektro.oneindustry.one* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://elektro.oneindustry.one/vyznate-se-v-laserove-terminologii-a-jejich-uskalich/>
6. Laser pointers. *Wikimedia.org* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/df/Light_Amplification_by_Stimulated_Emission_of_Radiation.jpg/220px-Light_Amplification_by_Stimulated_Emission_of_Radiation.jpg
7. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser: Svařování laserem* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.html>. Prezentace. Vysoké učení technické
8. ACO Industries k.s. [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.acoindustries.cz/home/>
- 9I nterní dokumenty. Příbyslav: ACO Industries, 2021
10. KOTRÍK, Marcel. *Vliv ochranné atmosféry na vlastnosti svaru při indukčním laserovém svařování plechů z konstrukční uhlíkové oceli*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113064>
11. DEBS, Martin. *Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového předehřevu*. Brno, 2018. 76 s, 6 příloh, CD. Diplomová práce.
12. XFUME PRO. *BINZEL shop* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.binzel-abicor.com/uploads/Content/Germany/Pictures/Images_EXTRACTION_TECHNOLOGY/xfUME_FLEX_1125x600px_WEB.jpg

- 13 DULEY, Walter. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 14. 1. Hoboken: Wiley, 1999. ISBN 0-471-24679-4. ISSN 1042-6914.
- 14 RÝZNAROVÁ, Martina. *Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193052. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- 15 LASCAM SYSTEMS S.R.O. *Rozdělení laserů* [online]. 2015 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- 16 ŠULC, Jan. *Klasifikace laserů. Úvod do laserové techniky* [online]. Prezentace [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: https://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat_08.pdf
- 17 MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser: Základy laserové techniky* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf. Prezentace. Vysoké učení technické
- 18 ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. *Lasery, laserové technologie a stroje slaserem. Měření ve strojírenství* [online]. 17.7.2006, 2006(7,8) [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-astroje-s-laserem>
- 19 HOLUB, Matyáš. *Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru*. Brno, 2016. 62s, 1 příloha, CD. Diplomová práce.
- 20 KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. Lasery a optika* [online]. 2013, 19.2.2013 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-serupouzivanych-v-prumyslu-128>
- 21 HERRMANN, Dirk a Peter HERZOG. *Laser welding of copper. Industrial laser solutions* [online]. 2013, 1.1.2013 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.industrialasers.com/welding/article/16485604/laser-welding-of-copper>
- 22 PROCHÁZKA, Libor. *Studium vlivu ochranné atmosféry na kvalitu svaru a parametry laserového svařování*. Brno 2017. Diplomová práce.
- 23 ČÍP, T. *Svařování vysokopevnostních ocelí laserem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 107 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupný z WWW: ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace.

- 24 ČSN EN ISO 6520-1 (050005). *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů*. Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- 25 ČSN EN ISO 13919-1 (050335). *Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti*. Část 1: Ocel. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- 26 ČSN EN 1011-6 (052210). *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů*. Část 6: Laserové svařování. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- 27 ČSN EN ISO 17637 (051180). *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- 28 ČSN EN ISO 17639 (051128). *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- 29 ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- 30 BLAHUTA, Ladislav. *Nedestruktivní zkoušky svarů* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4239492-Nedestruktivni-zkousky-svaru.html> Prezentace.
- 31 KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011, 375 stran : ilustrace, portréty. ISBN 978-80-904582-2-2.
- 32 KOŇÁR, Radoslav. *Elektronický katalóg defektov a ich ultrazvukových indikácií pri skúšaní materiálů novou ultrazvukovou metódou Phased Array* [online]. žilina, 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://kti.uniza.sk/wp-content/uploads/2018/01/Ekatalog_KEGA.pdf. Projekt. Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta Katedra technologického inžinierstva.
- 33 MRŇA, Libor, Jan PAVELKA, Petr HORNÍK a Jozef HRABOVSKÝ. *Use of schlieren methods to study gas flow in laser technology* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309961266_Use_of_schlieren_methods_to_study_gas_flow_in_laser_technology. Konferenční publikace. Vysoké učení technické v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
BPP	Beam Parameter Product	[mm·mrad]
Ce	Uhlíkový ekvivalent	[hm%]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d ₁ , d ₂	Úhlopříčky vtisku	[μm]
D _{foc}	Průměr ohniska	[mm]
EN	Evropská norma	[-]
HV	Tvrдость podle Vickerse	[-]
I	Výkon v ohnisku	[W·cm ⁻²]
ISO	International organization for standardization	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
P	Výkon laseru	[W]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S _{foc}	Plocha ohniska	[cm ⁻²]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
YAG	Yttrium Aluminium Granát	[-]
Z	Kontrakce	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázky praktických použití laseru	9
Obr. 2 Model vyráběného roštu	10
Obr. 3 Vývin zplodin při svařování	10
Obr. 4 Rozmístění svařovacího pracoviště	11
Obr. 5 Možný design odsavače	11
Obr. 6 Odsavač xFUME	12
Obr. 7 Kontinuální režim svařování	13
Obr. 8 Pulzní režim svařování	14
Obr. 9 Schéma polovodičkové laserové diody	14
Obr. 10 Spojený stoh	14
Obr. 11 Rezonátor s RF buzením.....	15
Obr. 12 Typy pevnolátkových laserů.....	16
Obr. 13 Tyče aktivního prostředí	17
Obr. 14 Výbojkový systém	17
Obr. 15 Detail zadního buzení	17
Obr. 16 Diskový laser	18
Obr. 17 Vláknový laser.....	19
Obr. 18 Schéma vláknového laseru	19
Obr. 19 Laserové svařování	20
Obr. 20 Závislost absorpce na vlnové délce	21
Obr. 21 Kondukční režim svařování.....	22
Obr. 22 Penetrační režim svařování.....	22
Obr. 23 Typy módů TEM	23
Obr. 24 Typy přívodu ochranného plynu.....	25
Obr. 25 Vady svarového spoje.....	26
Obr. 26 Princip kapilární zkoušky	29
Obr. 27 Magnetická prášková metoda	29
Obr. 28 Ultrazvuková zkouška	30
Obr. 29 Zkouška prozáření	30
Obr. 30 Tahový diagram.....	31
Obr. 31 Zkouška ohybem.....	32
Obr. 32 Zkouška rázem v ohybu.....	33
Obr. 33 Zkouška hloubením podle Erichsena.....	33
Obr. 34 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	34
Obr. 35 Kontrola makrostruktury	34
Obr. 36 Kontrola mikrostruktury	35
Obr. 37 Proudění ochranné atmosféry	36
Obr. 38 Princip šlírové metody	37
Obr. 39 Využití nit'ových sond	37
Obr. 40 Princip LIBS analýzy.....	38
Obr. 41 Princip EDX analýzy	38
Obr. 42 Robotizované pracoviště ve firmě ACO Industries.....	39
Obr. 43 Nákres vzorků.....	41
Obr. 44 Upínací přípravek	41
Obr. 45 Použití metody nit'ových sond pro první případ.....	42
Obr. 46 Použití metody nit'ových sond pro druhý případ.....	42
Obr. 47 Použití metody nit'ových sond pro třetí případ.....	43

Obr. 48 Použití metody nitřových sond pro čtvrtý případ	43
Obr. 49 Svařování bez odsávání	44
Obr. 50 Svařování s odsáváním	44
Obr. 51 Rozměry zkušebního tělesa	45
Obr. 52 Umístění vzorků	46
Obr. 53 Zkušební zařízení.....	46
Obr. 54 Umístění vzorků	47
Obr. 55 Metalografická pila.....	47
Obr. 56 Lisovací zařízení a metalografická bruska	47
Obr. 57 Mikroskop s fotoaparátem	48
Obr. 58 Snímek vzorku č. 1	48
Obr. 59 Snímek vzorku č. 3	49
Obr. 60 Snímek vzorku č. 4	50
Obr. 61 Snímek vzorku č. 5	50
Obr. 62 Tahový diagram	52
Obr. 63 Snímek vzorku č. 1B	53
Obr. 64 Snímek vzorku č. 2B	54
Obr. 65 Snímek vzorku č. 3B	54
Obr. 66 Výstupní data analýzy EDX	55
Obr. 67 Mieův efekt rozptylu záření.....	55
Obr. 68 Testovací zařízení	56
Obr. 69 Uložení roštu.....	56
Obr. 70 Rošt po zkoušce	57
Obr. 71 Vhodné odsávání	58
Obr. 72 Plymovent MonoGo	58
Obr. 73 Kemper Filter-Cell XL	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení laserů	13
Tab. 2 Srovnání metod svařování	21
Tab. 3 Vlastnosti ochranných plynů	24
Tab. 4 Stupně jakosti svarových spojů	27
Tab. 5 Přehled svarových vad	27
Tab. 6 Chemické složení použitého materiálu	38
Tab. 7 Mechanické vlastnosti použitého materiálu	38
Tab. 8 Parametry odsávání	42
Tab. 9 Přehled provedených svarů	43
Tab. 10 Síla pro porušení vzorků	44
Tab. 11 Parametry experimentu	49
Tab. 12 Fotografie vytvořených svarů	49
Tab. 13 Svařovací parametry vzorků	50
Tab. 14 Výsledky tahové zkoušky	50
Tab. 15 Výsledky testování roštů	55
Tab. 16 Vlastnosti odsávacích zařízení	56
Tab. 17 Porovnání technologií MAG a laser	57
Tab. 18 Doba návratnosti jednotlivých zařízení	57
Tab. 19 Doporučené svařovací parametry	58

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem na základě těchto údajů: jednoznačný údaj pro přiřazení č. 4363902 KS Ferony č. 586155 DL č. 21/62/09756807 objednávka zákazníka č. 1210203684 na množství 543,60 KG.

Inspection certificate 3.1 according to EN 10204

A02

U.S.Steel Košice, s.r.o. A01 Vstupný areál U.S.Steel 044 54 Košice SLOVAK REPUBLIC		Purchaser Art. No: 727SHBY0/09C A09 Works Order No: XC0A4154 A08 Advice No: 20/111330 01 A10 Your order: 113732/V A07		FERONA Slovakia, a.s. A06 Bytčická 12 011 45 ŽILINA Slovenská republika			
METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 20/111330 01 A03				B09			
Desc. of goods: HEAVY PLATES IN COILS B01				Size: 5,000 x 1500,0 mm EN 10051/10			
Standard: EN 10025-2/19 B02		B03		Net Weight: 41 330 kg B13			
Quality: S235JRC+N B02		Delivery Note: 21588801 A10					
Unit No	Coil No	Heat	B07	Unit No	Coil No	Heat	B07
4363902	4363902	43639		4363904	4363904	43639	

M E C H A N I C A L T E S T R E S U L T S


	Min. / Max.	Coil No 4363902	Coil No 4363904
C12 Rm(T) (MPA)	360/510	443	442
C11 ReH(T) (MPA)	235/	327	319
C13 A5(T) (%)	24,0/	33,0	32,5

C02 Direction: (T) -transversal;

C71

C H E M I C A L C O M P O S I T I O N, %

	Min. / Max.	Heat No 43639		Min. / Max.	Heat No 43639
C	/0,17	0,13	Mn	/1,40	0,52
Si	/0,03	0,02	P	/0,035	0,014
Al	0,020/	0,038	N	/	0,004
S	/0,035	0,008	Cr	/0,29	0,02
Cu	/0,55	0,02	CEV	/0,35	0,22
Mo	/0,11	0,00	Ni	/0,42	0,01
V	/0,10	0,00			

THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS. Z01		453 Last Page: 1	
The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 + Am241 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg. D02		F-USM/0063-04/10-01-12	
Z04  06 1015-CPR-J-02517-19 DoP USSK-02/2019 www.usske.sk	Z05	Z02 Signature Not Verified Digitally signed by Ing. Vlasta Cernáková Date: 2020.10.17 08:31:30 CEST Reason: Zabezpečuje vierohodnosť pôvodu,	Z03 U. S. Steel Košice, s.r.o. 02 Vstupný areál U. S. STEEL Odbor Analýzy kvality a špecifikácie Uvoľňovanie výrobkov a Hutné atesty 044 54 Košice
Košice: 17.10.2020, 7:31:52		Z02	
Ján Godina, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail: InspectionDocument@sk.uss.com, tel.: +421-55-6739404			

1.0037

Číselné označení

Nelegovaná ocel obvyklé jakosti**S235JR**

Značka

Chemické složení [hm. %]

C ¹⁾	Si	Mn	P	S	N ²⁾
max 0,17	–	max 1,40	max 0,045	max 0,045	max 0,009

Normy EN[1] 10025+A1³⁾**Mechanické vlastnosti**

Polotovary		dlouhé a ploché výrobky						
Rozměr t [mm]		≤ 1	>1 ≤ 1,5	>1,5 ≤ 2	>2 ≤ 2,5	>2,5 ≤ 3	>3 ≤ 16	>16 ≤ 25
Stav		volí výrobce						
Mez kluzu R _{eH} [MPa] min		235						225
Mez pevnosti R _m [MPa]		360–510					340–470	
Tažnost A ₅ [%]	podél min	–					26	
	příčně min	–					24	
Tažnost A ₈₀ [%]	podél min	17	18	19	20	21	–	
	příčně min	15	16	17	18	19	–	
Nárazová práce KV [J] podél min ⁴⁾		–					27	

Svařitelnost

– vhodná pro svařování

Uhlíkový ekvivalent CEV = max 0,35 %

Ostatní vlastnosti

Způsob desoxidace – podle volby výrobce

Použití

Konstrukční součásti menších tloušťek, i tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky.

Porovnání se zahraničními materiály

<i>EURO</i>		<i>Česká republika</i>		<i>Německo</i>	
Fe360B	EN 10025	–	–	St37-2	DIN 17100
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Itálie</i>	
E24-2	NF A35-501	–	–	Fe360B	UNI 7070
<i>ISO</i>		<i>USA</i>		<i>Rusko</i>	
E235B	ISO 630	1015	ASTM A29	–	–
<i>Japonsko</i>		<i>Čína</i>		–	
STKM 12C	JIS G3445	–	–	–	–

Poznámky

1) Platí pro $t \leq 16$ mm, pro výrobky $16 < t \leq 25$ mm je obsah C = max 0,20 %

2) Překročení stanovené hodnoty je přípustné za předpokladu, že na každé zvýšení obsahu N o 0,001 % se sníží max. obsah P o 0,005 %; obsah N v rozboru tavby nesmí být vyšší než 0,012 %.

Max. hodnota pro N neplatí, jestliže obsah $Al_{calc} = \min. 0,020$ % nebo jestliže jsou přítomny jiné vhodné prvky, které vážou N. Obsah těchto prvků musí být uveden v dokumentu kontroly.

3) Podle normy ČSN EN 10025+A1 z roku 1996, která byla v platnosti do roku 2005.

4) Platí pro výrobky s $t > 10$ mm

Příloha č.1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

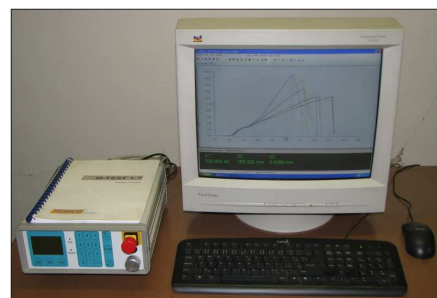
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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

Technické parametry:

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

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



Řídicí jednotka EDC 60