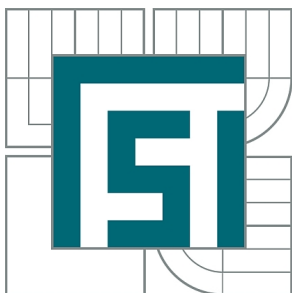


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM ZÁVISLOSTI GEOMETRIE SVARU NA PROCESNÍCH PARAMETRECH PŘI LASEROVÉM HYBRIDNÍM SVAŘOVÁNÍ KOROZIVZDORNÉ AUSTENITICKÉ OCELI

STUDY ON DEPENDENCY OF THE WELD GEOMETRY ON PROCESS PARAMETRES IN LASER
HYBRID WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL JIREŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Jireš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Studium závislosti geometrie svaru na procesních parametrech při laserovém hybridním svařování korozi-vzdorné austenitické oceli

v anglickém jazyce:

Study on dependency of the weld geometry on process parameters in laser hybrid welding of austenitic stainless steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při laserovém hybridním svařování Laser-TIG vznikají svary s různou geometrií (hloubka, šířka, plocha svaru) v závislosti na procesních parametrech. Úkolem je u získaných svarů tyto geometrické parametry proměřit a přiřadit je k procesním parametrům (výkon laseru, posuvná rychlost, svařovací proud TIG)

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si základy laserového hybridního svařovacího procesu. Osvojit si základy měření geometrie svaru.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

JIREŠ Daniel: Studium závislosti geometrie svaru na procesních parametrech při laserovém hybridním svařování korozivzdorné austenitické oceli

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studia oboru strojírenské technologie zkoumá vliv laserového hybridního svařování na korozivzdornou austenitickou ocel ČSN 17 240 (dle DIN 1.4301). Je to nejpoužívanější druh korozivzdorné oceli, doporučené pro použití v agresivní atmosféře jako je např. plavecký bazén nebo mořská voda. Zkušební vzorky, na kterých byly provedeny svarové housenky různou rychlostí a jinými parametry svařování, byly metalograficky zkoumané. Výsledky ukázaly, že největší geometrické parametry jako je hloubka a šířka tavné lázně mají vzorky s rychlostí svařování $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, nejmenší geometrické parametry mají vzorky se svařovací rychlostí $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Klíčová slova: penetrace, základní materiál, elektroda, proces

ABSTRACT

JIREŠ Daniel: Study on dependency of the weld geometry on process parameters in laser hybrid welding of austenitic stainless steel

The project has been solved during the bachelor's degree of engineering technology examines the the influence of laser hybrid welding austenitic stainless steel ČSN 17240 (DIN 1.4301). This steel is the most widely used type of stainless steel, recommended for use in aggressive environments such as a swimming pools, laboratories or facilities in contact with sea water. The test specimens, which were performed on the weld bead at different speeds and other welding parameters, were metallographically investigated. The results showed that the highest geometric parameters such as depth and width of the weld pool have the samples with welding speed $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the smallest geometrical parameters have the samples with the welding speed $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Keywords: penetration, base material, electrode, process

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIREŠ, Daniel. *Studium závislosti geometrie svaru na procesních parametrech při laserovém hybridním svařování korozivzdorné austenitické oceli*. Brno, 2014. 36s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 30. 5. 2014

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

Obsah

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ.....	10
1.1 Způsob svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas)	10
1.2 Průmyslové lasery	11
1.3 Laserové svařování.....	14
2 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE.....	16
2.1 Hybridní svařování.....	16
2.2 Základní sestavy hybridních procesů	17
2.3 Závislost proudu a napětí	18
2.4 Hloubka průvaru.....	18
2.5 Elektroda TIG.....	19
2.6 Svařovací rychlost a úhel hořáku s přídavným materiálem	20
2.7 Vzdálenost mezi laserem a obloukem.....	21
2.8 Ochranný plyn a jeho směsi	22
2.9 Průmyslové využití laser- TIGu	23
3 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ.....	24
3.1 Nedestruktivní zkoušky.....	24
3.2 Destruktivní zkoušky	26
3.3 Svarové vady.....	27
4 PRAKTICKÁ ČÁST	29
4.1 Použité zařízení.....	29
4.2 Výpočet specifického vneseného tepla Q_s :	30
4.3 Měření geometrie svaru.....	32
5 ZÁVĚRY	36

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD

Dnešní doba je charakteristická velkým technickým rozvojem např. v oblasti svařování. Laserové technologie se stále více uplatňují v průmyslové výrobě, a to zejména při dělení a svařování materiálu. S vývojem nových ocelí je potřeba vyvinout i technologie, které je budou schopny zpracovávat s vysokou kvalitou a minimálními náklady. Používání korozivzdorných ocelí představuje především v chemickém průmyslu často jedinou možnost z hlediska zabezpečení provozu, životnosti, bezpečnosti a ekologie.

V současné době obloukové metody nestačí na náročné podmínky výroby, jako jsou např. nízké svařovací časy, malé tepelně ovlivněné oblasti a tím malé deformace. Pak zmizí nutnost dokončovacích operací, proto se přistupuje k vývoji nových technologií. Hybridní svařování je jednou z nich.

Práce byla provedena pomocí laseru firmy IPG s označením YLS 2000 o maximální výkonu 2000 W. Laserová hlava: Precitec YW30 s ohniskovou vzdáleností 200 mm, TIG: Fronius TransTiG 1700. Na obr. 1 jsou ukázky z použití hybridní a laserové technologie.



Obr. 1 Laserová technika [1, 2]

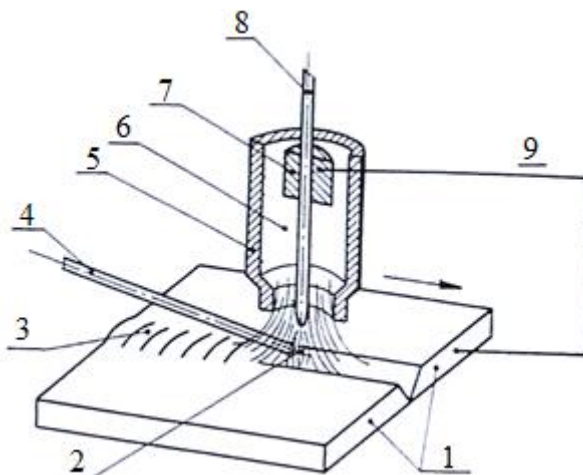
1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Cílem svařování je vytvořit spojení určitých částí povrchů dvou nebo více součástí, aby vzniklý nerozebíratelný spoj měl požadované vlastnosti a vyhovoval podmínkám provozování. Teprve v 80. letech 19. století byly zkoumány tři metody svařování. Metoda svařování elektrickým obloukem, plamenem a odporové svařování. V průmyslu byly použity o několik let později. Svařování je stále se rozvíjející poměrně mladou technologií a je nedílnou součástí strojího průmyslu. Zpracovává zhruba čtvrtinu kovových materiálů. Pro úspěšné zvládnutí procesu svařování je zapotřebí znalostí celé řady vědních oborů, jako jsou např. fyzika, matematika, chemie, nauka o materiálech a další [3].

1.1 Způsob svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas)

Během svařování metodou TIG hoří elektrický oblouk mezi základním materiálem a netavicí se elektrodou. Jako ochrana svařovacího procesu před okolní atmosférou se používá inertní plyn. Nejčastěji se využívá argon, helium nebo jejich směsi. Svařovat lze s přídavným materiálem v podobě drátu, který přidáváme buď ručním způsobem a nebo automaticky (s podavačem) s variabilní rychlostí posuvu do místa hoření oblouku. Metodu TIG můžeme rozdělit podle použitého elektrického proudu. Střídavý proud se používá na svaření hořčíku, hliníku a jejich slitin. Stejnosměrný proud používáme na svařování vysokolegované oceli, mědi, niklu, zirkonu. Použití metody TIG na uhlíkové oceli se provádí jen zřídka a to z důvodu vzniku pórovitosti ve svaru a také z ekonomických důvodů. Svařování wolframovou elektrodou se využívá na spojení materiálů, které mají vysokou afinitu ke kyslíku, např. titan a zirkon. Pomocí metody TIG můžeme svařovat i různorodé materiály jako ocel s mědí, bronzem nebo niklovými slitinami. Oblast použití metody TIG je velmi široká - od svařování hliníkových slitin pro dopravní průmysl přes svařování žárupevných ocelí pro stavbu kotlů a tepelných pecí až po jadernou energetiku. Na obr. 2 je vidět schéma TIG [3].

1. Svařovaný materiál
2. Elektrický oblouk
3. Svar
4. Přídavný materiál
5. Plynová trubice
6. Ochranný plyn
7. Kontaktní kleštiny
8. Wolframová elektroda
9. Zdroj proudu



Obr. 2 Ukázka principu svařování TIG [3]

Metalurgické a technologické výhody metody TIG:

- inertní plyn zajišťuje ochranu svarové lázně,
- produkuje elektrický proud o vysoké stabilitě,
- vysoká operativnost při svařování v různých polohách,
- jednoduchá obsluha a jednoduché regulování parametrů při svařování.

Nevýhody metody TIG:

- malá produktivita,
- vysoká technická náročnost na svařovací zařízení [3].

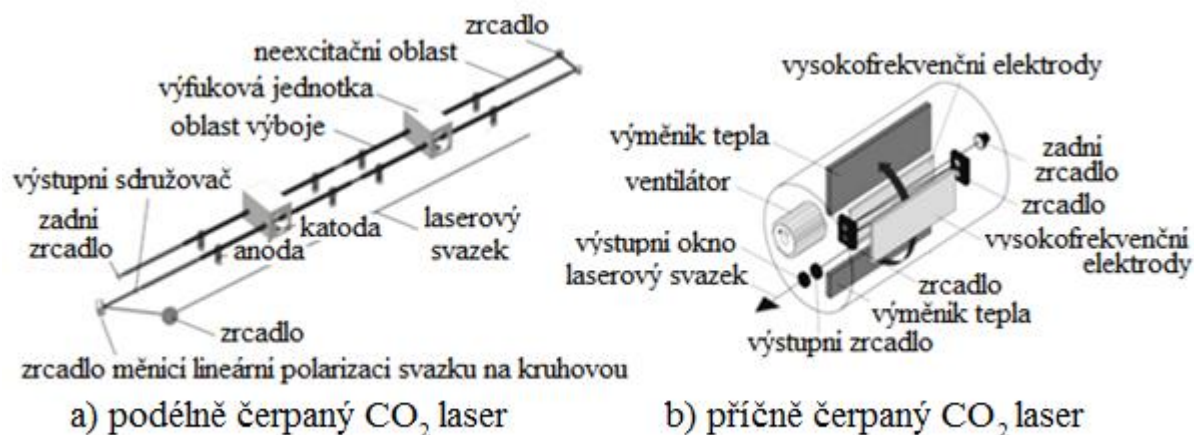
1.2 Průmyslové lasery

➤ Plynový CO₂ laser

Výkonový plynový CO₂ laser s aktivním prostředím vynalezl M. Patel v roce 1964. Prostředí je tvořeno směsí plynů: He + N₂ + CO₂. Směs je uzavřena ve skleněné trubici. Poměr plynů se mění, ale nejběžnější je 82:13,5:4,5. Celý proces zesílení se zahajuje vysokonapěťovým nebo vysokofrekvenčním elektrickým výbojem, tím se vybudí molekuly dusíku do vyššího energetického stavu. Při nepružných srážkách molekul dusíku s molekulami oxidu uhličitého dojde k předání energie, čímž dojde k jejich excitaci. Vyzáření fotonu je důsledek přechodu CO₂ molekuly z vyšší hladiny na nižší. U výkonových plynových laserů se používá helium. Helium uspiší návrat molekul CO₂ do základního stavu, aby se proces záření mohl opakovat.

Směs plynů proudících v trubici musí být stále doplňovaná. Podle způsobu proudění plynů v aktivní zóně rozlišujeme CO₂ lasery s podélným nebo příčným prouděním pracovní látky. Na obr. 3 jsou vidět schémata obou způsobů. Lasery CO₂ pracují v kontinuálním nebo pulsním režimu a jejich výkon je v rozmezí od 0,5 do 20 kW. Dosahují maximálních hodnot až 200 kW.

Laser s podélným prouděním, který je buzen elektrickým výbojem v ose trubice, je používán především pro řezání materiálů. Typ s příčným prouděním je vhodný pro svařování. U tohoto laseru je výrazně menší spotřeba plynů, proto klesají náklady na jejich provoz. Účinnost CO₂ laserů se pohybuje kolem 15%. Difúzně chlazený deskový SLAB laser je nejnovějším typem CO₂ laseru [3, 6].



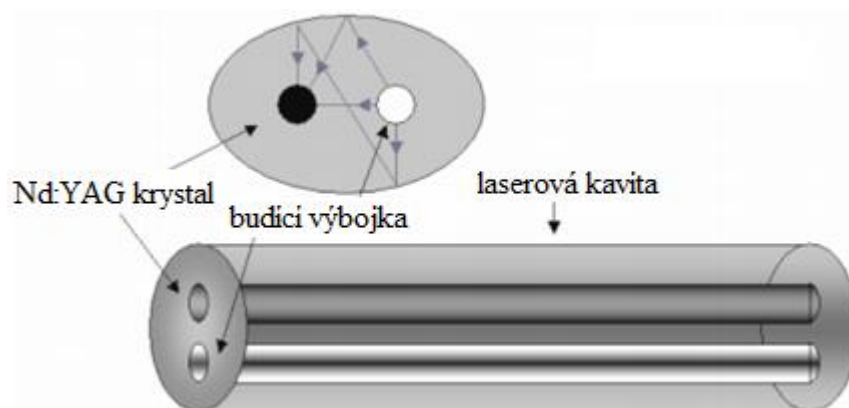
Obr. 3 Schéma laserů [6]

➤ Nd:YAG laser

Mezi významné typy laserů patří pevnolátkový čtyř-hladinový Nd:YAG laser. Aktivní prostředí laseru je tvořeno krystalem yttrium-aluminium-granát (Y₃Al₅O₁₂) a doprovázený 0,3 % až 1 % ionty neodymu Nd³⁺. Vlnová délka prvku neodym je 1064 nm, což je desetkrát méně než je vlnová délka CO₂ laseru. S vlnovou délkou souvisí průměrný výkon laseru. Maximální výkon Nd:YAG laserů v porovnání s CO₂ - dosahují nižších hodnot, ale dávají kvalitnější a užší svazek záření a proto dávají dostatečně vysokou hustotu výkonu.

Laserová kavita je obal s pozlaceným vnitřním povrchem pro aktivní prostředí s krystalem a budící vývojkou u pevnolátkového Nd:YAG laseru. Používá se pro docílení maximální účinnosti čerpání aktivního prostředí. Laserová kavita má eliptický tvar. Tyčinkový krystal spolu s výbojkou je umístěn ve skleněných trubcích v jejich ohniskových přímkách. Na obr. 4 je ukázána laserová kavita. Chlazení je zajištěno chladicí deionizovanou vodou, která proudí kolem trubic a předává teplo vzduchu ve vnějším obvodu. Nd:YAG laser využívající

kryptonovou nebo popřípadě xenonovou výbojkou dává účinnost jen 1 % až 3 %, protože dosahujeme nízké účinnosti čerpání aktivního prostředí. Tato účinnost se pohybuje kolem 10 % a vyšší celkovou účinnost kolem 20 % docílíme nahrazením výbojky polem laserových diod. Je to nejúčinnější způsob buzení pevnolátkových laserů [3, 6].



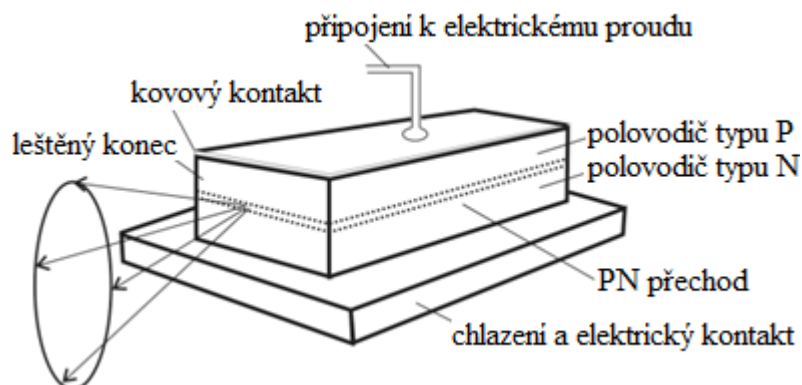
Obr. 4 Laserová kavita Nd:YAG laseru [6]

Důležitou výhodou Nd:YAG laseru oproti CO₂ laseru je možnost navázat svazek záření do optického vlákna. Tato výhoda umožňuje velkou flexibilitu pro svařování různých tvarů a rozměrů. Používaly se pro svařování v kombinaci s optickými vlákny. Další významnou předností je svařování neželezných kovů, použitím Nd:YAG laseru při jejich svařování dostáváme velmi dobré výsledky [6].

➤ Diodové lasery

Diodový laser je vytvořený sdružením laserových diod do řad, bloků nebo baterií v návaznosti na požadovaný výkon. Při svařování diodové lasery zaujímají podstatné místo u svařování plastů. Laserové diody dosahují výkon v řádech jen několika miliwattů, ale diodové lasery mohou dosáhnout výkon v řádech kilowattů.

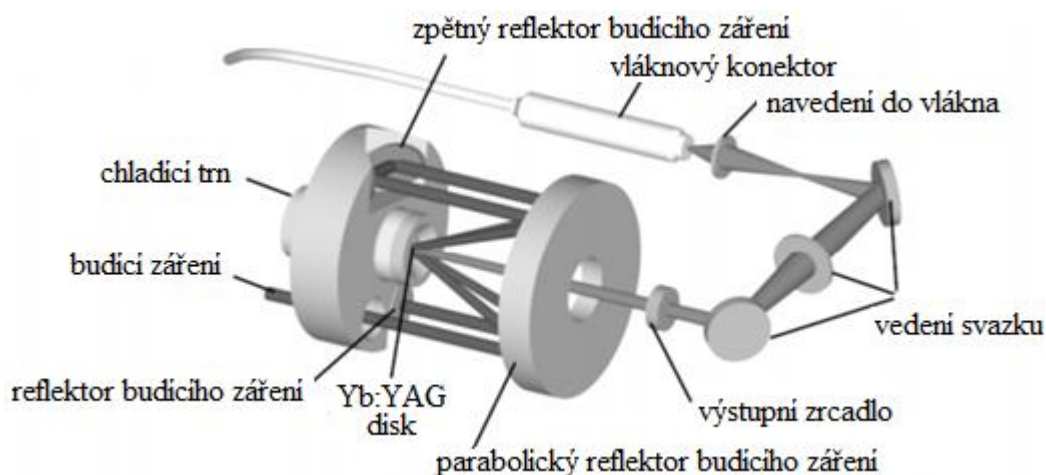
Aktivním prostředím laserové diody je polovodič, který je čerpáný elektrickým proudem. Záření je emitováno z PN přechodu, který má plochu řádově v mm². Záření se šíří v rovině přechodu a opakovanými odrazy se zesiluje. Diodové lasery dosahují výkonu 20 kW. Kvalita svazku záření je nižší než u jiných typů laseru, proto se diodové lasery používají na svařování a povrchové úpravy materiálu, když není potřeba zaměřit paprsek na malou plochu, ale naopak je výhodou větší průměr paprsku. Diodové lasery mají obdélníkový průřez svazku. Velkou výhodou diodových laserů je jejich nízká hmotnost a vysoká účinnost, která se pohybuje kolem 40 %. Diodové lasery můžeme také navázat do optického vlákna. Na obr. 5 je vidět schéma laserové diody [3, 6].



Obr. 5 Schéma laserové diody [6]

➤ Diskový laser

Diskové neboli kotoučové Yb:YAG lasery jsou modifikace Nd:YAG laserů. Aktivní prostředí je zde tvořeno diskem o výšce několika desetin milimetrů a o průměru zpravidla 100 mm, obsahující 30 % ytterbia. Chlazení probíhá tak, že zadní strana disku je napojena na celoplošný kontaktní chladič. Čerpání probíhá mnohonásobnými dopady záření diod přivedené optickými vlákny. Diskové lasery mají účinnost až 30 % a dosahují výkonu až 16 kW. Svazky mají vysokou kvalitu. Předností diskových laserů je nezávislost kvality svazku záření na výkonu laseru. Velmi úzký svazek záření, který dávají diskové lasery slouží k svařování materiálu větších tloušťek s malou tepelně ovlivněnou oblastí. Výstupní svazek záření má průměr několika milimetrů. Na obr. 6 je ukázáno schéma diskového laseru [6].

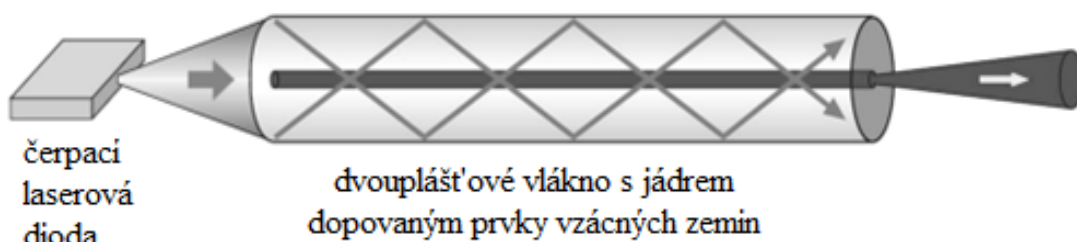


Obr. 6 Schéma diskového laseru [6]

➤ Vláknové lasery

Vláknové lasery mají aktivní prostředí v podobě optického vlákna. To je tvořeno křemenným vláknem s průměrem jádra několika mikrometrů v délce několika metrů. Je doprovázené nejčastěji ionty erbia, ytterbia a thulia. Čerpání vláknového laseru je realizováno zářením laserových diod kolmo na průřez aktivního vlákna. Záření se pak dále šíří pomocí odrazů na vnitřní straně pláště. Tento způsob čerpání patří k neúčinnějším. Schéma vláknového laseru je uvedeno na obr. 7.

Pomocí jednoduchého uspořádání aktivního prostředí vláknového laseru je dostačující chlazení vzduchem. Vláknové lasery dosahují velké kvality paprsku. Výkon jednoho vlákna dosahuje až 10 kW, tento výkon je dostačující pro většinu průmyslového využití. Pro zvýšení výkonu je možné kombinovat jednotlivá vlákna, prostorovým složením jednotlivých svazků do společné výstupní čočky. Na druhou stranu se zvyšuje rozbíhavost svazku, a tím snižujeme jeho kvalitu. Kombinací vláken dostáváme kontinuální výkon až 50 kW, tento výkon se používá pro svařování s hloubkou průvaru až několik centimetrů. Mezi hlavní výhody vláknových laserů patří jejich velká účinnost, která dosahuje až 30 %, dále kompaktnost, vysoká živostnost, minimální údržba a u jedno-modových laserů vysoká kvalita [6].



Obr. 7 Schéma vláknového laseru [6]

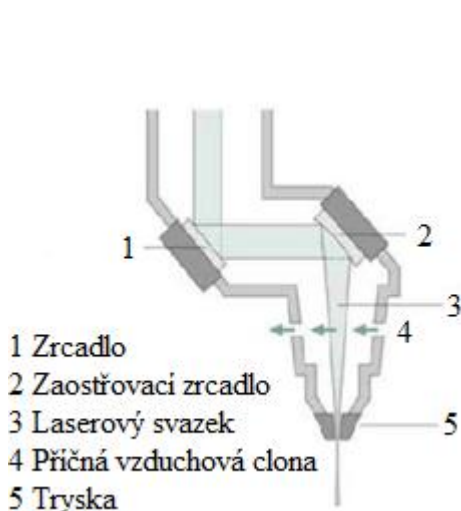
1.3 Laserové svařování

Během laserového svařování vzniká paroplynová komora dále jen „keyhole”, která je vyplněná parami kovu pod vysokým tlakem. Parametry při svařování musí být nastaveny tak, aby se svařovaný materiál neodpařoval dříve než se prohřeje podpovrchová vrstva na teplotu tavení. Pomocí laseru svařujeme materiály s dobrou tepelnou vodivostí např. Cu, Ag, Al, ale svařujeme materiály i s vysokou teplotou tavení Mo, W, Ta, Ti. Vysoká rychlost ochlazování je díky malému vnesení tepla do svaru. Svařování vysokolegovaných ocelí, niklu a molybdenu se docílí velmi dobrých výsledků. Většinou se laserem svařuje bez přídavných materiálů.

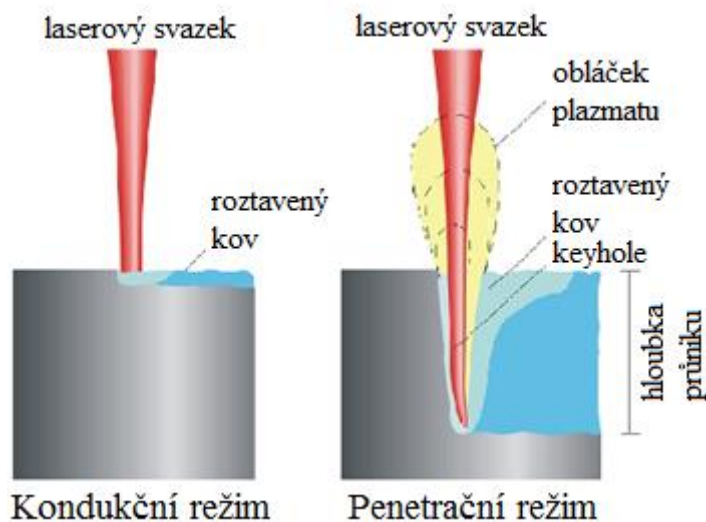
Bezpečnost a ochrana zdraví je při práci s laserem velmi důležitá. Hrozí poškození očí a pokožky. Ochranu oka zajišťujeme ochrannými brýlemi z organického skla a pokožku chráníme vhodným oděvem a rukavicemi. Dalším vhodným způsobem je použití krytování místa svařování kryty z organického skla.

Pomocí laseru můžeme způsobit místní natavení nebo odpaření materiálu. Místní natavení se používá v praxi k odstranění vrstvy fólie nebo svaření tenkých plechů. V případě odpaření kovu vzniká tzv. keyhole. Laserové svařování tedy můžeme rozdělit na kondukční a penetrační. Na obr. 8 je popsána laserová svařovací hlava. Na obr. 9 jsou vidět oba režimy svařování [3, 4].

- Kondukční svařování- hustota energie $\leq 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$
- Penetrační svařování- hustota energie $\geq 10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$



Obr. 9 Laserová svařovací hlava [5]



Obr. 8 Režimy laserového paprsku [19]

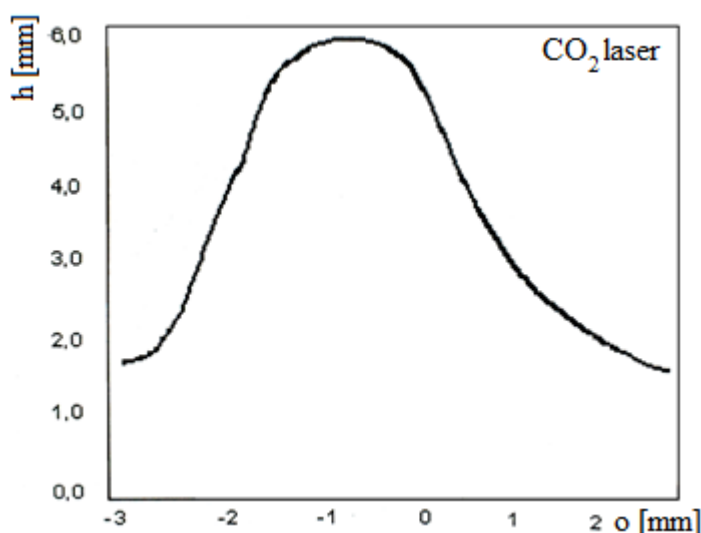
Výhody laserového svařování

- svar vysokou štíhlostí,
- vysoké svařovací rychlosti,
- velmi malá tepelně ovlivněná oblast,
- snadná automatizace procesu svařování,
- provoz laseru je čistý, bez potřeby přidání přídavných materiálů,
- tichý provoz hluboko pod hranicí hluku,
- svařování od malých tloušťek do cca 20 mm,
- laserový paprsek můžeme pomocí zrcadel a hranolů dělit na různá místa [3].

Se zvyšující se svařovací rychlostí klesá hloubka průvaru a také velikost deformací základního materiálu.

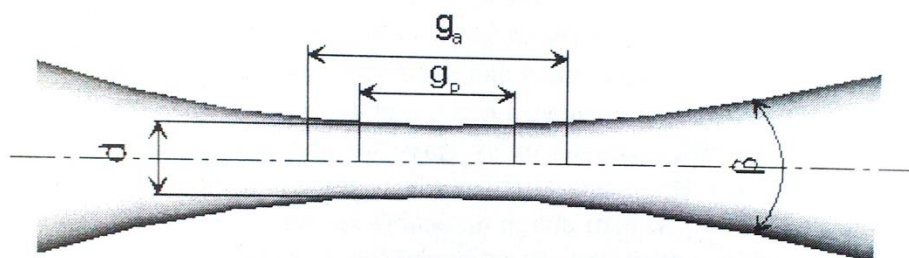
Na geometrii svaru má velký vliv průměr laserového svazku a tím velikost hustoty energie dopadající na svařovaný materiál. Aplikace většího průměru paprsku než je optimální, způsobuje zvětšení šířky a zmenšení hloubky svaru. Penetrační svařování se změní na kondukční a efektivita procesu klesá. Průměr laserového svazku v místě svařování závisí na poloze ohniska laseru vzhledem k povrchu svařovaného materiálu. Optimální poloha ohniska

zaručuje maximální hloubku průvaru, která je dále závislá na svařovaném materiálu. Na obr. 10 je vidět závislost hloubky penetrace na vzdálenosti od ohniska. Závislost má podobu Gaussovy křivky. Výzkumy ukazují, že při konstantních parametrech svazku se maximální hloubka penetrace dosáhne, když je ohnisko umístěné těsně pod povrchem svařovaného materiálu asi jeden mm. Výkon a průměr laserového svazku v místě dopadu na materiál určuje hodnotu hustoty výkonu laserového svazku. Optický fokusační systém zajišťuje



Obr. 10 Závislost hloubky na poloze ohniska [20]

požadované geometrické charakteristiky a hustotu výkonu laserového svazku v místě interakce paprsku s kovem. Na obr. 11 jsou znázorněny parametry laserové svazku [20].



Obr. 11 Geometrické parametry laserového svazku [20]

Na vyhodnocení optimálního úhlu má vliv:

- g_p - podélný rozměr ohniskové oblasti. Jeho hodnota se určí jako vzdálenost mezi průřezy svazku, v kterých je intenzita záření dvojnásobně snížena oproti intenzitě v ohnisku,
- g_a - aktivní úsek, vzdálenost mezi průřezy laserového svazku, v kterých je intenzita na ose rovná pravé svářecí intenzitě,
- d - průměr zaměřeného svazku v ohnisku,
- β - je úhel fokusace [20].

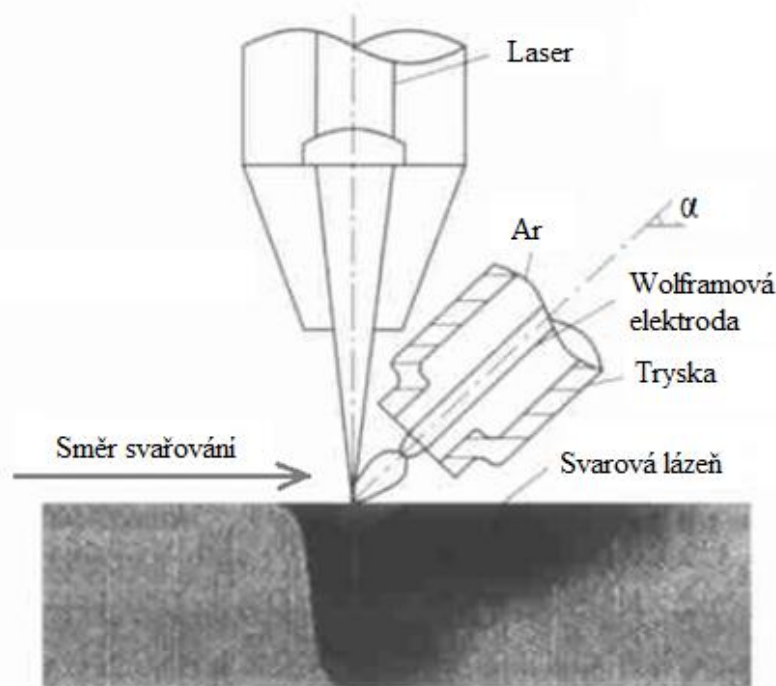
2 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE

Hybridní svařování se sestává z laserového paprsku a některé obloukové metody TIG, MIG, MAG (Metal Active Gas, Metal Inert Gas) princip metody vidíme na obr. 12. Při hybridním svařování je jedna svarová lázeň na rozdíl od tandemového svařování, kde jsou svarové lázně dvě. Hybridní svařování je zkoumáno od konce sedmdesátých let minulého století na Univerzitě v Liverpoolu.

2.1 Hybridní svařování

Laserový paprsek vytváří hluboké a velmi kvalitní svařování kořene svaru bez přídavného materiálu. Současně přivedený elektrický oblouk může dodávat chybějící přídavný materiál do místa svaru. Hořák obloukového svařování je souose s laserovým paprskem. Laserový paprsek i elektrický oblouk postupují ve stejném směru. Laser- TIG hybridní metoda odhalila slibnou metodu svařování tenkých nerezových plechů z austenitické oceli.

Srovnáváme-li klasické a hybridní svařování, tak hybridní technologie šetří výrobní čas součásti i přídavný materiál. Jednoprůchodový svar je možno vykonat rovnou bez zkosení svarových ploch do tloušťek 10 mm. Laserové záření se odráží od stěn a předává energii po celé ploše, která se ohřívá rovnoměrně. Plochy základního materiálu nemusí být odmaštěny, protože všechny tuky a nečistoty na plochách jsou odpařeny. Nejvhodnější mezera při svařování se pohybuje mezi 0,05 až 0,2 mm [7, 8, 9].



Obr. 12 Princip hybridní svařování [7]

Výhody:

- vysoká efektivita a ekonomika provozu,
- menší spotřeba přídavného materiálu,
- malé deformace základního materiálu, snížení dokončovacích operací jako např. rovnání,
- zdokonalení stability oblouku,
- hluboké proniknutí do základního materiálu,
- automatizace procesu.

Nevýhody:

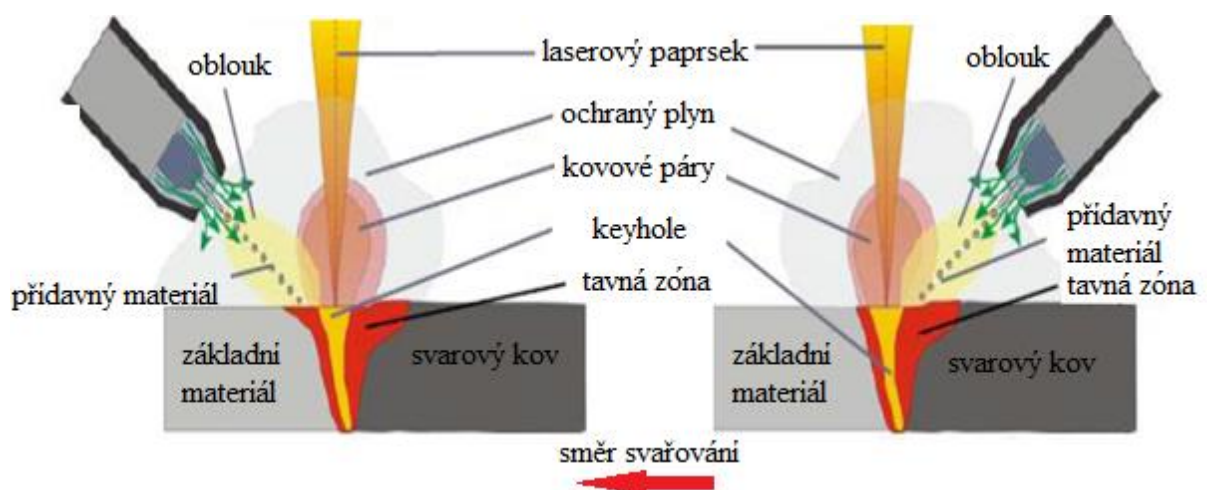
- vysoké pořizovací náklady,
- malá zkušenost konstruktérů a technologů s touto technologií [8, 9].

2.2 Základní sestavy hybridních procesů

V současné době se používají různé druhy kombinací hybridních procesů. Hybridní procesy jsou závislé na použitém zdroji laserového záření, které je sdruženo s obloukovým svařováním tavící se elektrody (MIG/MAG) a nebo s obloukovým svařováním netavící se elektrody (TIG). V hybridním svařování je používán laserový paprsek, který má vysokou energetickou hustotu tepelného zdroje a funguje jako primární zdroj tepla.

Pomocí primárního zdroje vytváříme hluboké svary (až 25 mm). Zatímco oblouk, který působí jako sekundární zdroj tepla, provádí pomocné funkce, jako např. zlepšení stability a účinnosti procesu, dále zvyšuje spolehlivost a kvalitu výsledného svarového spoje. Jsou známy dvě základní sestavy procesu, které jsou popsány na obr. 13 [8].

- Laserový paprsek předchází oblouku (obr. 13 vpravo)
- Oblouk předchází laserovému paprsku (obr. 13 vlevo)



Obr. 13 Sestavy procesu hybridního svařování [8]

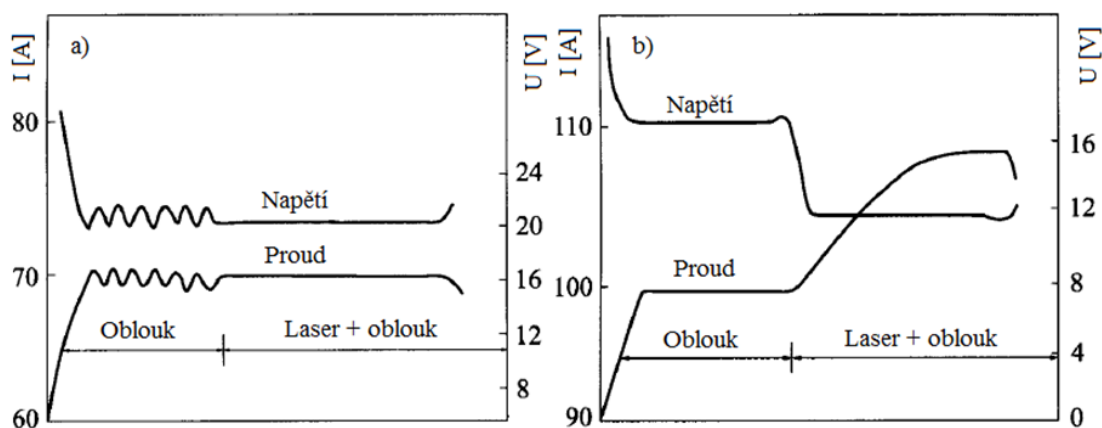
V sestavě, kdy laser taví základní materiál jako první, bylo zjištěno, že toto postavení je vhodné pro svařování hliníku. Laserový paprsek odstraňuje vrstvu oxidů na rozdíl od svařování obloukem, což nám umožňuje stabilizování procesu. Laser v předním postavení má další výhodu v tom, že po svaření má housenka svaru lepší vzhled.

Sestava, kdy oblouk předchází laseru, je výhodná, protože se základní materiál protaví do větší hloubky. Je to způsobeno tím, že laser působí v místě, kde už je svarová lázeň a tak laser proniká materiálem s větší účinností než u pevného materiálu. Při použití hybridního svařování elektrický oblouk snižuje elektronovou hustotu laserového plazmatu. Tím oslabuje schopnost laserového plazmatu absorbovat a odrážet laserovou energii, tímto dochází ke zvýšení tepelné účinnosti laserového paprsku. Bylo zjištěno, že při hybridním laser-TIG svařování je velmi významným faktorem stabilizační efekt laserového paprsku. Ten zvyšuje rychlost svařování až o 300% při uspořádání laseru a TIG na opačných stranách svařovaného materiálu. Nárůst rychlosti byl zjištěn i u svařování titanu a měkké oceli při uspořádání laseru a TIG na stejné straně svařovaného materiálu (o 100%). Snížení pórovitosti bylo zkoumáno pomocí RTG záření v reálném čase. Byl pozorován proud kapaliny ve svarové lázni. Výsledky ukázaly, že „keyhole” je dlouhá a úzká. Stabilní chování laseru v tavné lázni přispěl k útlumu vzniku bublin.

Hybridní svařování není jen prostá kombinace laseru s elektrickým obloukem, ale je to složitý fyzikální proces mezi dvěma teplotními zdroji [8].

2.3 Závislost proudu a napětí

Jednou z předností hybridního svařování TIG v porovnání s hybridním MAG svařováním je, že přídavný materiál je samostatně přidáván do elektrického oblouku. Tím dovoluje samostatně sledovat svařovací proud a plnicí rychlost posuvu přídavného materiálu. Když bychom zvýšili svařovací rychlost o 100% a penetraci o 20% u samotného laseru, tak výsledek můžeme srovnat s laser- TIG svařování s proudem 100 A. Pokud by byl proud u svařování obloukem pod 150 A, tak se oblouk stává nestabilní při zvyšování svařovací rychlosti. Oblouk následuje trasu minimálního odporu od elektrody k obrobku. Ustálení obloukového svařování a okamžitý pokles napětí po zapnutí laserového paprsku je znázorněno na obr. 14 [8].



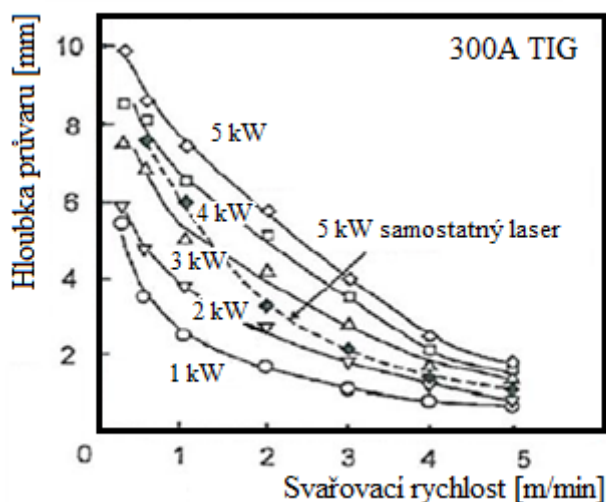
Obr. 14 Charakteristika proudu a napětí [8]

Schéma a) znázorňuje ustálení proudu a napětí v oblouku po zapnutí laseru, na schématu b) je vidět snížení odporu a tím narůstání proudu díky působení laseru [8].

2.4 Hloubka průvaru

M. D. Gureev zkoumal efektivitu laser- TIG hybridního svařování s dvěma dalšími metodami. Oznámil, že laser- TIG svařování má skoro dvakrát vyšší rychlost tavení než součet oblouku a laseru, když pracují samostatně.

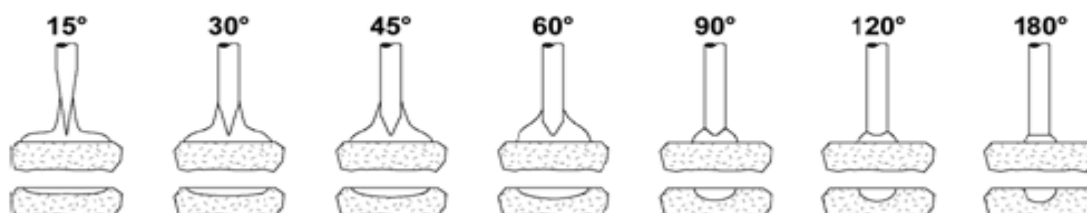
J. Matsuda oznámil, že s 300A TIG obloukem dostává hodnoty přibližně 1,3 až 2 krát vyšší hloubku průvaru než se samotným CO₂ laserem v závislosti na svařovací rychlosti. Tím potvrdil závěry M. D. Gureeva. Hloubka průvaru v závislosti na svařovací rychlosti je znázorněná na obr. 15. Někteří autoři tvrdí, že z důvodu chybějícího přídavného materiálu je snazší řídit svařovací proces laser-TIG než svařování laser- MIG [8].



Obr. 15 Porovnání hloubku průvaru při různých rychlostech [8]

2.5 Elektroda TIG

Nejčastěji se pro laser- TIG používají elektrody vyrobeny ze slitin wolframu, protože wolfram má vysokou teplotu tání (3410 °C). Elektrody jsou zpravidla vyráběné slinováním. K wolframu se přidávají přísady jako thorium nebo zirkon pro zvyšování výkonu, vyšší životnosti elektrody a stabilizaci oblouku. Je nezbytné, aby byly používány správné elektrody s ohledem na svařovací proud. Špatně zvolená elektroda může způsobovat nestabilitu oblouku. Dále je potřeba dbát na potencionální problém s nečistotami na povrchu elektrody vzniklé usazením kovových par. Dalším problémem je vysoká afinita wolframu ke kyslíku a tím případné nežádoucí oxidaci. Tyto problémy také způsobují nestabilitu oblouku. Elektrody mají různé průměry od 0,5 do 6,3 mm. Nejčastěji používané jsou elektrody od 1,6; 2,5 a 3,2 mm. V tab. 1 jsou doporučené hodnoty zdroje energie pro používané elektrody. Důležité je také to, jaký je na špičce elektrody úhel. Velikost úhlu ovlivňuje tvar a velikost tavné lázně. Velikosti úhlů a tvar tavné lázně ilustruje obr. 16. Je nezbytné podotknout, že při vysokých proudech úhel špičky souvisí s velikostí tavné lázně. Může docházet k rozšiřování lázně a tím snížení hloubky průvaru [8].



Obr. 16 Tvar špičky elektrody [8]

Nejméně výhodné je brousit elektrody do špičatého tvaru pod úhlem 15° speciálně pokud budeme dělat krátké svary na malé části svarku. Nejvýhodnější je plochá elektroda, která má úhel 180° [8].

Malé úhly mají tento vliv:

- pro snadné zažehnutí oblouku,
- možnost několika oblouků,
- menší svarový průnik,
- krátká životnost elektrody.

Velké úhly:

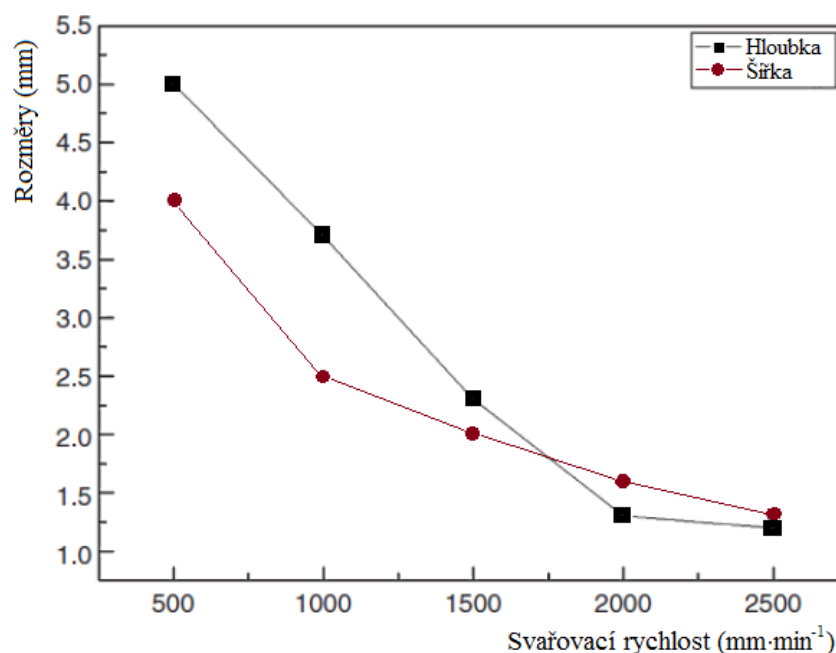
- zpravidla těžší zažehnutí oblouku,
- dobrá stabilita oblouku,
- velký svarový průnik,
- dlouhá životnost elektrody.

Tab. 1 Průměry elektrod s doporučeným proud [8]

Průměr elektrody (mm)	Stejnoseměrný proud elektroda negativní [A]		Stejnoseměrný proud elektroda pozitivní [A]		Střídavý proud [A]	
	nelegovaný wolfram	legovaný wolfram	nelegovaný wolfram	legovaný wolfram	nelegovaný wolfram	legovaný wolfram
0.5	2-20	2-20	-	-	2-15	2-15
1.0	10-75	10-75	-	-	15-55	15-70
1.6	40-130	60-150	10-20	10-20	45-90	60-125
2.0	75-180	100-200	15-25	15-25	65-125	85-160
2.5	130-230	170-250	17-30	17-30	80-140	120-210
3.2	160-310	225-330	20-35	20-35	150-190	150-250
4.0	275-450	350-480	35-50	35-50	180-260	240-350
5.0	400-625	500-675	50-70	50-70	240-350	330-460
6.3	550-875	650-950	65-100	65-100	300-450	430-575

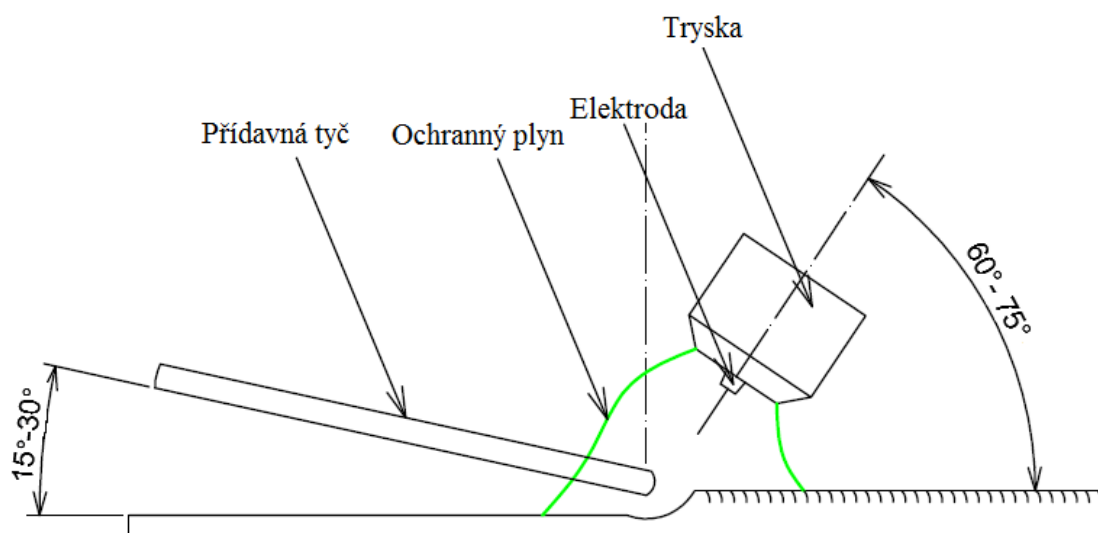
2.6 Svařovací rychlost a úhel hořáku s přídavným materiálem

Rychlost, kterou se svařuje, má vliv na šířku tavné lázně a také na hloubku, do které jsme materiál schopni roztavit. To je ukázáno na obr. 17. Při zvyšování svařovací rychlosti dochází ke snížení hloubky průniku laseru a zmenšování šířky svaru. Zmenšení penetrace je důsledkem tepelného příkonu, který působí na svařovanou desku. Je však zajímavé, že při svařování hoříčkových slitin, za použití nízkých energií hybridního svařování je svařovací oblouk stabilní při vysokých rychlostech mezi 1500- 2000 mm·min⁻¹. Rychlost svařování má také vliv na náklady procesu [8].



Obr. 17 Velikost šířky a hloubky svaru v závislosti na rychlosti [8]

V průběhu svařování je přídavný materiál a hořák oblouku držen v předem daných úhlech. Hořák by měl být pod úhlem mezi 60° - 75° od kovového povrchu svařované desky. Přídavný materiál je přidáván pod úhlem mezi 15° - 30° od povrchu desky. Na obr. 18 jsou vidět úhly zakótované. Osa laserového paprsku je směřovaná kolmo na kovovou svařovanou desku do místa svařování [8].



Obr. 18 Úhly hořáku a přídavné tyče [8]

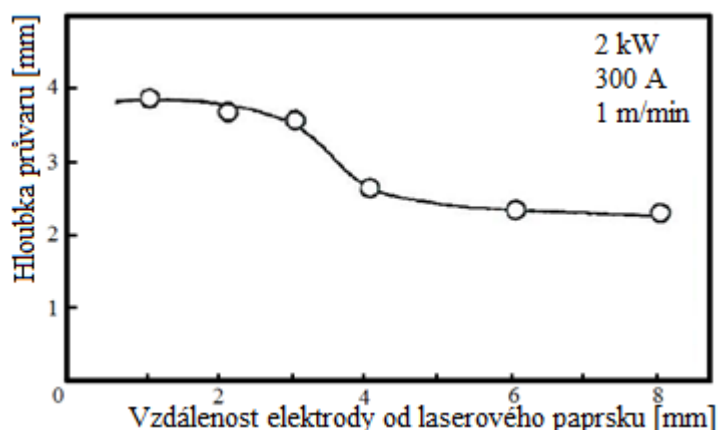
Přídavný materiál používáme při hybridním TIG svařování jen občas. Zvolený přídavný materiál volíme s ohledem na základní kov, druh svarového spoje a případné povrchové úpravy. Poté co byl přidán přídavný materiál s nižším bodem tání a větším rozsahem tuhnutí, než základní materiál bylo zjištěno, že přídavný materiál poskytuje dobrou svařitelnost a snižuje svarové trhliny po svaření. Jsou známy čtyři druhy přídavných kovů- základní drát, tyč, trubkové elektrody a tavidla.

Použití přídavného materiálu vyžaduje vyšší výkon svařování a nižší svařovací rychlost. To znamená, že bude dražší výroba součástí. V průběhu svařování, kdy je elektroda v negativním módu, musí být přídavný materiál přidáván ve stejném úhlu, je to pro zvýšení stability svařování. Výhody plynoucí z dodání přídavného materiálu do svařování:

- zlepší stabilitu procesu,
- dezoxidace,
- zbavování svarové lázně nečistot,
- zvýšení vodivosti,
- zlepšení plynulosti svařování,
- snížení pórovitosti,
- legování základního materiálu prvky, které se při procesu svařování vypařily [8].

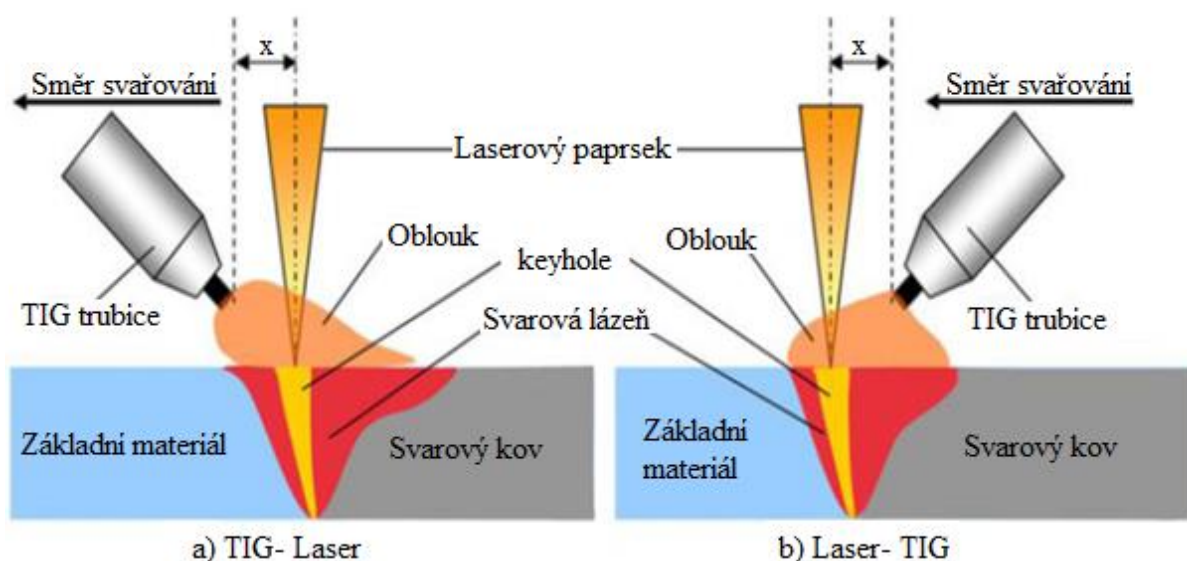
2.7 Vzdálenost mezi laserem a obloukem

Mezera laserového paprsku od trysky s wolframovou elektrodou lze označit jako jeden z nejdůležitějších parametrů svařování. Mezera má vliv přímo na svar i hloubku, do které jsme schopni základní materiál roztavit. Bylo objeveno, že se hloubka provaření materiálu zvyšuje, když mezera mezi laserem a elektrodou se zmenšuje. Avšak pokud je mezera 0,5 mm a menší hloubka průvaru se už nezměňuje. Navíc je zde nebezpečí, že laserový paprsek poškodí wolframovou elektrodu a dochází k nestabilitě oblouku. Na obr. 19 je vidět hloubka průvaru v závislosti na paprsku od elektrody. Pro docílení nejvyššího průvaru by špička elektrody od osy laserového paprsku měla být vzdálená 2- 3 mm. Dále by pak wolframová elektroda měla být umístěna přibližně 2 mm nad povrchem desky.



Obr. 19 Závislost vzdálenosti elektrody od laseru [8]

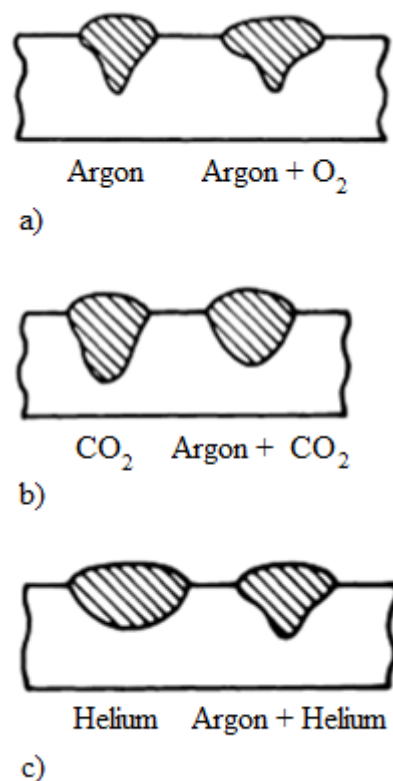
L. M. Liu prováděl experiment a zkoumal účinné polohy laserového paprsku a oblouku TIG. V různých režimech zkoumal účinnost tavení a hloubku průniku na slitinách hořčíku. Na obr. 20 je vidět mezera x mezi laserem a obloukem. Z výsledku zjistil, že hloubka průniku klesá se zvětšující se mezerou x u laser- TIG režimu, ale u TIG- laseru režimu se z počátku hloubka průniku zvětšuje a potom hloubka průniku také klesá. Když bude mezera větší než 5 mm, tak jsou výsledky hybridního svařování srovnatelné s TIG obloukem, který pracuje samostatně. Při laser- TIG módu se účinnost tavení kovu zvýší přibližně o 20%, ale u TIG- laser režimu je to přibližně 53% [8].



Obr. 20 Mezera mezi laserem a obloukem [8]

2.8 Ochranný plyn a jeho směs

Ochranný plyn je důležitou součástí hybridního TIG svařování. Běžně slouží k ustálení procesu svařování. Dalším účelem je vylepšení vlastností svařovaného spoje. Ochranná atmosféra překrývá svar během svařování a tím ho chránit před oxidací. Klíčovým faktorem pro docílení konečné kvality svarových ploch je chemické složení ochranné atmosféry. Jsou známy dva druhy ochranný plynů inertní nebo směsné. Mezi běžně používané patří vzácné plyny, jako např. helium a argon. Na výběr jsou k dispozici čisté ochranné plyny (He, Ar) nebo směsi plynů na bázi He, Ar, CO₂. Například pokud se svařuje CO₂ laserem a je použita ochranná atmosféra čistým Argonem, tak ochranný plyn výrazně podporuje pronikání paprsku, to znamená, že energie laserového paprsku proniká téměř celá do materiálu a zvyšuje se pronikání laseru. Argon nemá vůni a je bezbarvý. Argon je zhruba 1,4 krát těžší než vzduch a 10 krát těžší než helium, což umožňuje vynikající krytí svarové lázně. Jako inertní plyn nereaguje s dalšími prvky a sloučeninami. Argon dále stabilizuje oblouk a podporuje pronikání oblouku do větší hloubky základního materiálu. Helium je druhý nejlehčí prvek, je lehčí než vzduch, má nízkou hustotu a není jedovatý. Používá se kvůli vysoké tepelné vodivosti, která podporuje pronikání oblouku do větší hloubek. Ochranné atmosféry dosahují čistoty až 99,8%, vysoká čistota je důležitá pro kvalitu svaru. Na obr. 21 jsou vidět použité různé plyny a jejich vliv na tvar (šířku a hloubku) svaru. Směsi plynů se používají kvůli snížení nákladů na výrobu a vyvážení vlastností reaktivních plynů s inertními plyny. Dále se pak směsi plynů používají při svařování neželezných kovů jak např. hliníku, mědi a slitin niklu [8].



Obr. 21 Tvary svaru [8]

2.9 Průmyslové využití laser- TIGu

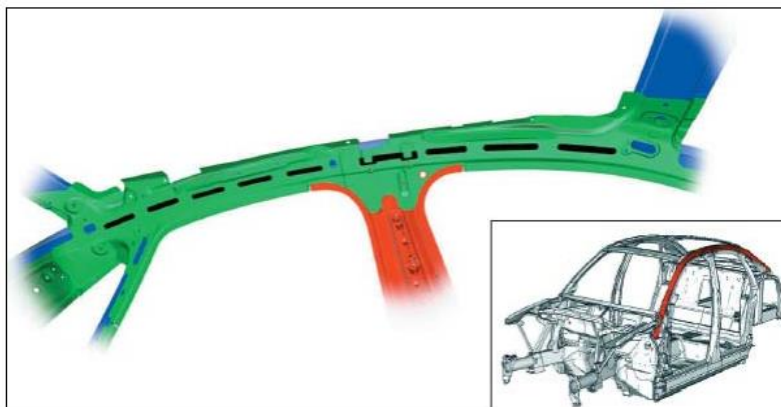
Svařování za pomoci laseru je vhodná technologie všude tam, kde je za potřebí velmi kvalitních svarů. Další vhodné použití je z hlediska sériové a hromadné výroby při automatizaci tohoto procesu. Nejčastěji by se tato metoda mohla používat:

- ve strojírenské výrobě (automobily),
- vojenském průmyslu,
- elektrotechnické výrobě,
- v železniční dopravě,
- doprava ropy a zemního plynu,
- k výrobě zdravotnické techniky [10].

Průmyslové využití hybridního svařování závisí na použití doprovodné obloukové metody. V hybridním svařování s hlavicí TIG můžeme svařovat s použitím přídavného materiálu a nebo bez použití přídavného materiálu. Pro hybridní svařování s TIG hlavicí za použití CO₂, Nd: YAG, Diodového, Diskového a Vláknového laseru používá především pro svařování tenkých plechů. Na rozdíl od hybridního svařování s použitou obloukovou metodou MIG, kde se svařují především koutové svary a to z důvodu stálého přísunu přídavného materiálu v podobě drátu. V současné době se začíná experimentovat s hybridním svařováním (laser-TIG) tlustých plechů.

Zhank Shenghai experimentoval s hybridním TIG svařováním na nízkolegované konstrukční oceli třídy 13, 14 tloušťky 16 mm. Tato ocel je používaná v jaderném, energetickém a lodním průmyslu. Po uskutečnění experimentu bylo zjištěno, že spoj má dobré přechodové vlastnosti mezi svarovým kovem a základním materiálem. Docílilo se i vynikajících mechanických vlastností. Také bylo zjištěno, že při hybridním svařování se efektivněji využívá laserové energie. Ze získaných výsledků lze říci, že hybridní technologie bude používána na svařování tlustých plechů.

V dnešní době je především v automobilovém průmyslu kladen důraz na snižování hmotností. Z toho důvodu se přistupuje k použití nových materiálů, které jsou lehčí, ale mají stejné nebo dokonce i lepší mechanické vlastnosti. Hybridním svařováním se docílují kvalitních svarů u lehkých materiálů jako jsou např. hliník a hořčík. Například části automobilu jako kryt motoru, kryt zavazadlového prostoru a části karoserie jsou vyrobeny právě z hliníku jako prostředek ke snížení hmotnosti. Konkrétně bylo hybridní svařování použito na vůz Audi A8. V porovnání hybridního s konvenčním MIG svařováním dostáváme u laser- TIGu výrazně vyšší svařovací rychlosti a větší hloubky penetrace. Hybridním svařováním se zde spojovaly plechové díly a lisované profily. Na celém vozidle bylo použito 65 svarů s celkovou délkou cca 5 m. Délky jednotlivých svarů se pochybovali od 30 do 260 mm. Na obr. 22 je vidět ukázka použití svařování na rámu vozidla. Použitou technologií byly sníženy tepelné deformace a zvýšena spolehlivost pracovního procesu i kvalita svarů [8, 10].



Obr. 22 Ukázky svarů na Audi A8 [10]

3 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ

Vadami ve svarových spojkách se rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami. Vady jsou způsobené především nevhodnou volbou svařovacích parametrů, nedostatečnou přípravou svarových ploch. Kontrolu svarů rozlišujeme podle vlivu, který mají na svarový spoj na nedestruktivní a destruktivní.

3.1 Nedestruktivní zkoušky

Jsou zkoušky, po kterých můžeme výrobek bez problému používat. Nedochází při nich k porušení svarových spojků. Zkoušky dělíme podle typu zjišťování vad na povrchové (kapilární, magnetická metoda) a vnitřních (prozařovací metoda, ultrazvukem). Základní zkouška je zkouška vizuální. [12, 13].

- Vizuální kontrola:

Vizuální zkouška je základní zkouška, která vždy předchází všem ostatním kontrolám. Používá se pro zjišťování zjevných povrchových defektů. Vizuální kontrola se provádí po dostatečném očištění svaru před dalšími technologickými operacemi např. nátěry. Základem pro úspěšné provedení zkoušky je dobře očištěný povrch od strusky a rozstříků, dobře osvětlené místo kontroly a ostrý zrak zkoušejícího. Vizuální kontrola je jediná metoda, kde vyhodnocujeme přímo vady, u ostatních metod vyhodnocujeme pouze indikace, které upozorňují na možný výskyt vad. Bývá zpravidla doplněná kontrolou vnějších rozměrů svaru – měřením převýšení svaru, překročením velikosti koutového svaru, hloubky a délky povrchových vad. Vizuální kontrola se rozděluje na přímou a nepřímou metodu. Přímá metoda se provádí pouhým okem nebo jednoduchými optickými pomůckami. Nepřímá je prováděna optickými přístroji tzv. endoskopy [12, 13].

- Kapilární (Penetrační) kontrola:

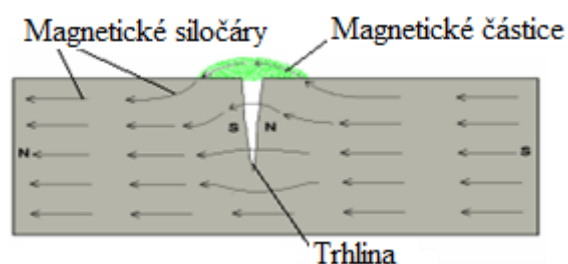
Při kapilární kontrole se zjišťují se pouze povrchové vady, které jsou přímo na povrchu zkoušené součásti. Metoda je vhodná pro zjišťování trhlin, pórů, zápalů. Metoda má daný postup a časové fáze. První fáze spočívá v přípravě kontrolovaného povrchu. Druhá fáze je nanášení penetrantu (zkušební kapalina). Ve třetí fázi se odstraňuje přebytek penetrantu. Poslední fáze je posouzení případných vad. Princip spočívá v použití vhodné detekční kapaliny, tato kapalina proniká do vad ve svaru. Po odstranění nadbytku kapaliny ze zkoušeného povrchu kapalina vzlíná, z míst kde jsou vady a obarvuje nanesenou vývojku. Výhody této metody jsou nenáročnost, nízká cena, poměrně velká citlivost, snadná indikace vad. Nevýhodou je objevení pouze povrchových vad, potřeba čistého a hladkého povrchu ($R_a = 3,2 \mu m$). Nutnost hledat vady brzy po nanesení vývojky. Na obr. 23 je ukázáno barevné zabarvení vad. Tato metoda je použitelná pro všechny materiály magnetické i nemagnetické. Metodu podle použitých prostředků zbarvení nazýváme metoda barevné indikace a metoda fluorescenční [12, 13].



Obr. 23 Ukázka kapilární kontroly [22]

- Metoda magnetická prášková

Tato metoda úspěšně odhaluje povrchové nebo vady, které jsou těsně pod povrchem (max. 2-3 mm). Základem této metody je zjišťování rozptylu magnetického toku, který



Obr. 24 Princip metody magnetické práškové [22]

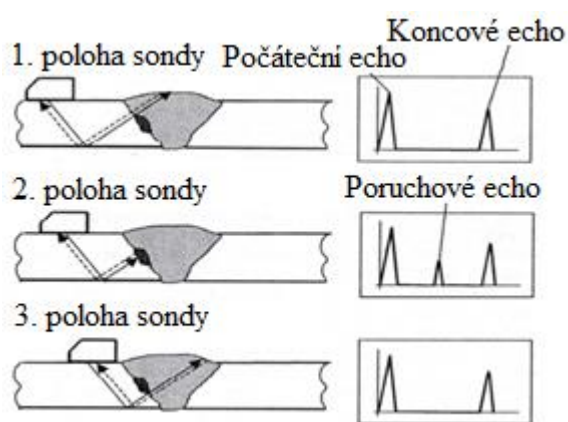
vznikne ve feromagnetickém materiálu v místě vad nebo změny magnetických vlastností. Na obr. 24 je vidět změna magnetického pole. Zjištěná trhлина není feromagnetická, proto ji magnetické pole obchází. Siločáry jsou viditelné pomocí jemného železného prášku. Pro lepší kontrast vad se používá železný prach s fluoreskující barvou, která po osvětlení ultrafialovým světlem intenzivně září. Zkoušený povrch můžeme zmagnetizovat tzv. magnetováním proudovým, použije se stejnosměrný nebo střídavý proud. Druhá možnost je použití elektromagnetu. Poustup zkoušky je úprava povrchu (zbavení okují, rzi), zmagnetizování zkoušeného povrchu, detekce vad, vyhodnocení a odmagnetování. Mezi výhody zkoušky patří její rychlost, malé náklady na zařízení, snadná obsluha. Nevýhodou je, že metodu můžeme použít jen na magnetické materiály [11, 12].

- Metoda ultrazvuková

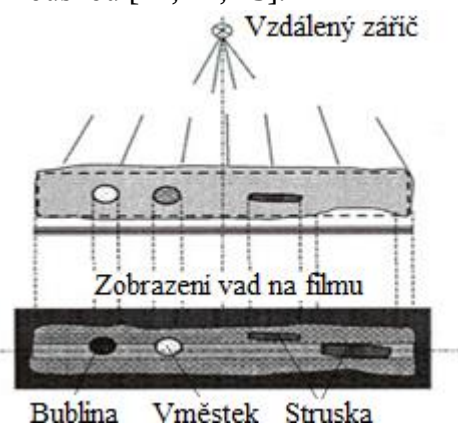
Ultrazvuková zkouška je založena na odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí, které mají rozdílné vlastnosti při šíření vlnění. Ultrazvukem je nazýváno akustické vlnění, frekvence vlnění leží nad hranicí slyšitelnosti. Zdrojem impulsů jsou ultrazvukové zkušební sondy. Základem sondy je elektroakustický měnič. Měníč mění elektrický signál na mechanický a nejčastěji se používají piezoelektrické měniče. Sondy dělíme podle vysílaného druhu vln na přímé a úhlové. Na obr. 25 je vidět princip úhlové sondy, kdy pohybujeme sondou po zkoušeném materiálu. V první a třetí poloze signál prošel, ve druhé poloze se odrazil od vady zpět do sondy. Výsledky vidíme na obrazovce. Počáteční echo je od povrchu materiálu, poruchové echo znázorňuje vadu a koncové echo od druhého konce materiálu. Výhodou metody je téměř okamžitý výsledek, možnost změřit i tloušťku materiálu, nižší cena než u prozařovací metody a není třeba používat bezpečnostní metody. Nevýhodou je špatné zjištění objemových vad a plošných vad umístěné v rovnoběžném směru vlnění a nutnost mít kontakt se zkoušeným výrobkem. Proto se doporučuje kombinovat přímé a úhlové sondy nebo ultrazvuk s prozařovací zkouškou [11, 12, 13].

- Metoda prozařovací (RTG)

Je nejstarší nedestruktivní metodou zkoušení svaru. Princip spočívá ve vysílání ionizačního záření na kontrolovanou oblast. V místě vad je záření pohlcováno a vady vyskytující se ve svaru mají odlišné barvy, jak je ukázáno na obr. 26. Metoda je určena pro vnitřní vady a špatně přístupné místa. Nejčastěji se používá rentgenové nebo gama záření. Rentgenové záření vzniká v tzv. rentgenkách. Zkouška rovinných tavných svarů je poměrně jednoduchá. Směr ionizujícího záření je nejčastěji kolmý na plochu svaru. Metoda je velmi citlivá na objemové vady jako bubliny, póry, kovové vměstky. Zkouška je méně citlivá na vady plošného charakteru, jakou jsou studené spoje a trhliny. Prozařováním je možné zkoušet materiály od několika milimetrů až po materiály s tloušťkou stovek milimetrů podle síly rentgenové lampy. Odhalí se všechny vady povrchové i podpovrchové. Nevýhody prozařovací zkoušky jsou nutnost odstínění záření a vyšší pořizovací náklady [12, 13].



Obr. 25 Práce s ultrazvukovou sondou [22]



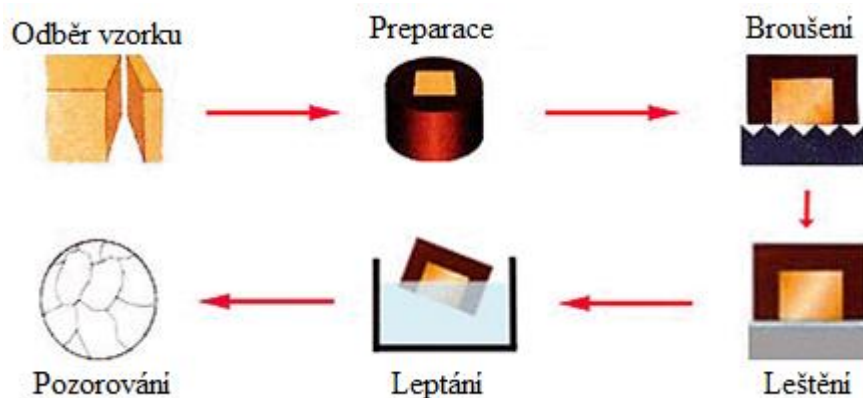
Obr. 26 Ukázka rentgenového odhalení vad [22]

3.2 Destruktivní zkoušky

Destruktivní neboli makroskopická kontrola je stanovení makroskopického charakteru svarového spoje. Zkoumaný svár se musí rozříznout. Kontrola se obvykle provádí kolmo k ose svaru. Je běžným doplňkem testů mechanických vlastností při ověření stavu struktury materiálu, resp. svarových spojů. Metalografické zkoušky dělíme podle použitého zvětšení na zkoumání makrostruktury a mikrostruktury. Destruktivní zkouškou se zabývá norma ČSN EN 1321. Na obr. 27 je vidět postup při přípravě vzorku [16].

Pro všechny destruktivní zkoušky je potřeba připravit vzorky. Postup při přípravě metalografického vzorku:

1. Odběr vzorku- vzorky z měkký materiálů se odebírají řezáním nebo frézováním. Tvrdé materiály jsou děleny odlamováním nebo elektrojiskrovými rezačkami. Při odběru nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění struktury.
 2. Preparace vzorku- se dělá, když je vzorek moc malý, přistupuje se k zalévání nebo zalisování.
 3. Broušení vzorku- má minimalizovat povrchové nerovnosti. Broušení provádíme ručně nebo mechanicky broušícími papíry s největší drsností až po nejjemnější.
 4. Leštění vzorku- je podobný princip jako u broušení jenom s tím rozdílem, že ze vzorku neubývá materiál. Brusivo má podobu prášku, pasty nebo suspenze.
 5. Leptání vzorku- slouží k vyvolání především mikrostruktury. V závislosti na materiálu je možné použít různé druhy jako např. leptání na hranice zrn, plošné leptání, selektivní leptání.
 6. Hodnocení vzorku- vyhodnocení vzorku po provedení předchozích operací, nejčastěji se hodnotí za použití mikroskopů, výsledky lze dokumentovat na fotografiích [17].
- Makrostrukturní rozbory- provádí se pouze vizuálním pozorováním pouhým okem nebo při malém optickém zvětšení (optický mikroskop do cca zvětšení 30x, lupa). V případě svarových spojů se používá pro hodnocení tvaru svaru, způsobu kladení svarových vrstev, odmísení svarového kovu, šířky a charakteru tepelně ovlivněné oblasti, hranice ztavení atd.
 - Mikrostrukturní rozbory- provádí se na vhodně připravených metalografických výbrusech zkušebních vzorků při používání optických nebo elektronových mikroskopů. Zvětšení se pohybuje v rozsahu cca 30x až 2000x. Výsledky mikrostrukturních rozborů jsou posouzeny vzhledu mikrostruktury, stanovení plošného podílu strukturních fází nebo složek, stanovení obsahu nekovových vměstků v ocelích, stanovení velikosti zrna [16].

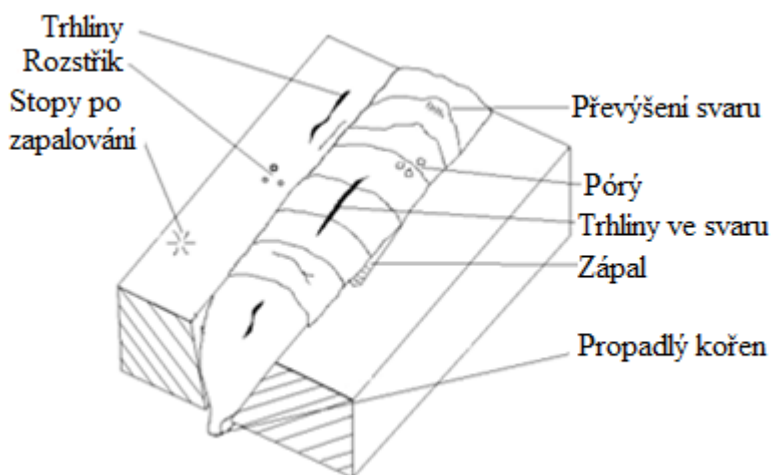


Obr. 27 Schéma přípravy metalografického vzorku [15]

3.3 Svarové vady

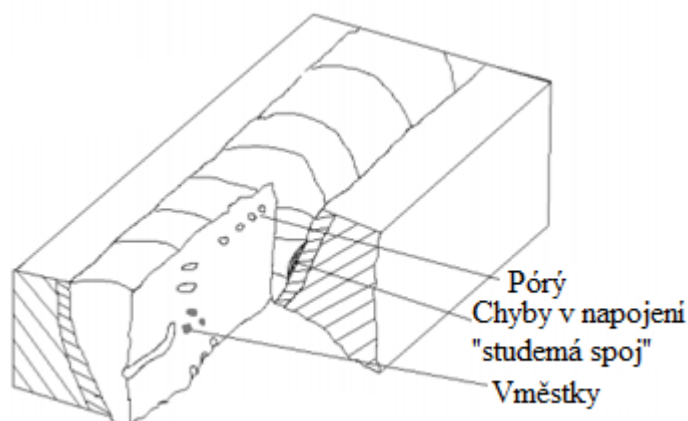
Vady mohou být povrchové nebo skryté. Povrchové jsou vady, které se odhalí pouhým okem (vizuální) nebo jednoduchými nástroji. Vady skryté se zjišťují složitějšími přístroji (RTG, ultrazvuk). Podle norem mohou být vady přípustné nebo nepřípustné. Vady přípustné jsou takové, které normy dovolují a neovlivňují mechanické vlastnosti spoje. Přípustné vady není nutné odstraňovat. Nepřípustné vady jsou takové, které neodpovídají normám a musí být odstraněny. Tyto chyby mohou být opravitelné nebo neopravitelné. Vady rozdělujeme na plošné (trhliny, studené spoje) a objemové (póry, bubliny, nekovové vměstky, nedodržení rozměrů) [12].

Trhliny mohou vznikat v základním materiálu i ve svarovém spoji. Trhliny se rozdělují podle okamžiku vzniku na trhliny za tepla, na trhliny za studena a na lamelnární trhliny. Trhliny za tepla vznikají při tuhnutí a ochlazování tavné lázně při teplotách 800-1280 °C a závisí na metalurgické čistotě materiálu. Chemické složení základního materiálu je příčinou vzniku horkých trhlin. Vysoký obsah uhlíku, manganu a dalších legur napomáhá ke vzniku trhlin. Po skončení svařování se mohou objevit trhliny za studena. Na obr. 28 jsou znázorněny povrchové vady.



Obr. 28 Povrchové vady svaru [12]

Trhliny za studena se objevují při teplotách 200 - 300°C. Jsou způsobeny působením vodíku a tahovým napětím ve sváru. Lamelnární trhliny vznikají za vyšších teplot, ale mohou se šířit i za studena. Vznikají působením napjatosti v místech, kde jsou nečistoty. Rozstřík je tvořen kapkami roztaveného kovu, které ulpí v okolí svaru a je způsoben velkým svařovacím proudem, vlhkostí nebo nečistotami na svarových hranách. Póry nebo bubliny jsou objemové vady kulovitého tvaru. Vznikají při vysokých rychlostech svařování a nedostatečné ochraně tavné lázně před vlhkostí ve vzduchu. Obr. 29 ukazuje vnitřní vady.



Obr. 29 Vnitřní vady svaru [12]

obou okrajích kořene. Je to vada způsobená velkou posuvovou svařovací rychlostí nebo nevhodnou mezerou mezi svařovanými díly. Studený spoj je zapříčiněn nedokonalým natavením svarového kovu se základním materiálem, z důvodu nízkého svařovacího proudu. Vměstky jsou cizí částice ve svarovém kovu struskotvorného nebo oxidického původu.

Zápal vzniká na hranici svarové housenky a základního materiálu. Je to ostré natavení a propadnutí svarového kovu. Častěji se objevuje zápal u koutových spojů. Zápal je způsoben příliš dlouhým obloukem, nevhodným průměrem elektrody případně špatným vedením elektrody.

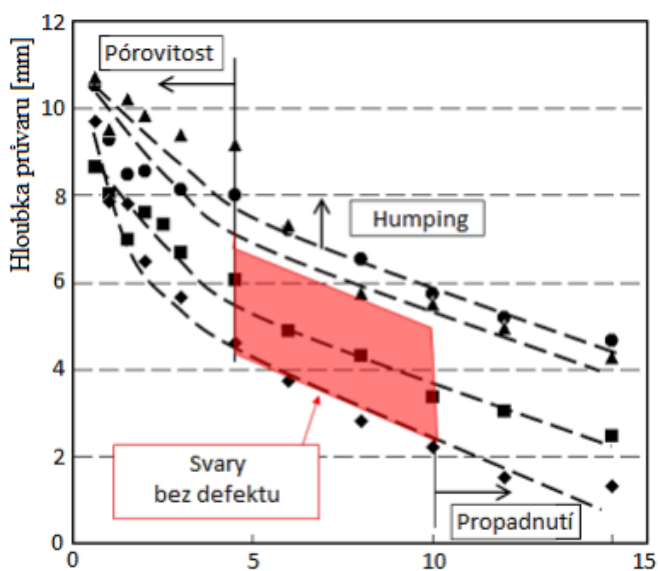
Propadlý kořen je mělká drážka po obou okrajích kořene. Je to vada způsobená velkou posuvovou svařovací rychlostí nebo nevhodnou mezerou mezi svařovanými díly. Studený spoj je zapříčiněn nedokonalým natavením svarového kovu se základním materiálem, z důvodu nízkého svařovacího proudu. Vměstky jsou cizí částice ve svarovém kovu struskotvorného nebo oxidického původu.

Struskové vměšky se do svaru dostávají ze strusky. Oxidické vměšky jsou způsobeny nedokonalým očištěním povrchu, nejčastěji se vyskytují oxidy hliníku a hořčíku. Vměšky vznikají v důsledku vysokých proudů a dotyku elektrod s tavnou lázní [13, 14].

Na konečnou kvalitu i geometrii svařeného spoje má vliv i hloubka tavné lázně. Čím je svarová lázeň užší, tím větší povrchové napětí působí na taveninu. Když dojde k nahromadění taveniny na povrchu lázně, které je zapříčiněno odražením zpětného toku taveniny vlivem velkého povrchového napětí, dochází ke vzniku „humpingu“.

Pórovitost, „humping“ a další vady svařování vznikají na základě parametrů svařování a materiálových vlastností a vzájemné kombinaci. Na obr. 30 je vidět vliv svařovací rychlosti na korozivzdornou ocel 17 240, když se svařuje laserovým paprskem. Průměr stopy paprsku je dán polohou ohniska vzhledem k povrchu svařovaného materiálu a spolu s výkonem má rozhodující vliv na hustotu energie.

Při vyšších svařovacích rychlostech nastává rozstřík taveniny a následné propadnutí svaru. Při nízkých rychlostech dochází k pórovitosti svarového spoje. Ideální je „střední“ rychlost, ale pouze při velkých průměrech stopy svařovacího laserového paprsku, který dopadá na materiál. Malé průměry dopadajícího laserového svazku s vysokou hustotou energie mají za následek vypaření základního materiálu, velkou dynamiku taveniny a „humping“ [20, 21].



Obr. 30 Vliv svařovacích parametrů [21]

„Spiking“ je další z vad při laserovém svařování. Objevuje se ve spodní části paroplynového kanálku a periodicky se opakuje. Dochází zde ke změně hloubky roztavení základního materiálu. Jak je vidět na obr. 31. „Spiking“ je výraznější při přerušovaném svařování, při zvětšující hloubce průvaru a zmenšujícím se průměrem paroplynového kanálku, tedy se zvyšující se měrnou energií a výkonu laserového paprsku. Velikost a odchylky od kuželovitosti paroplynového kanálku jsou závislé na energetických parametrech laseru [20, 21].

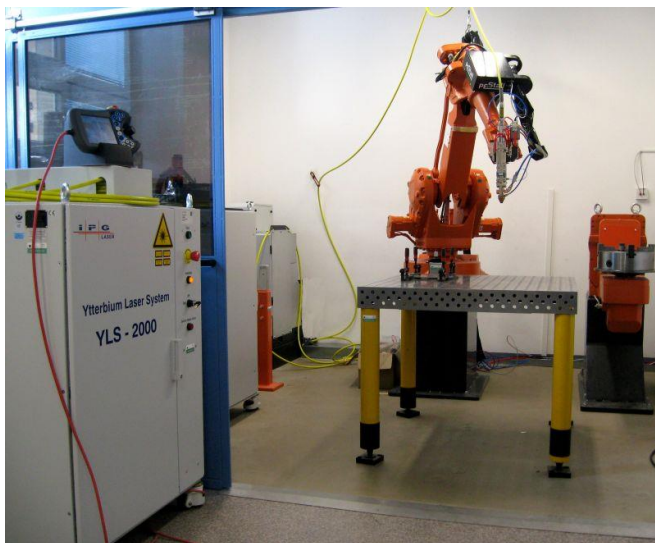


Obr. 31 Schéma mechanismu tvorby „spikingu“ a „humpingu“ [20]

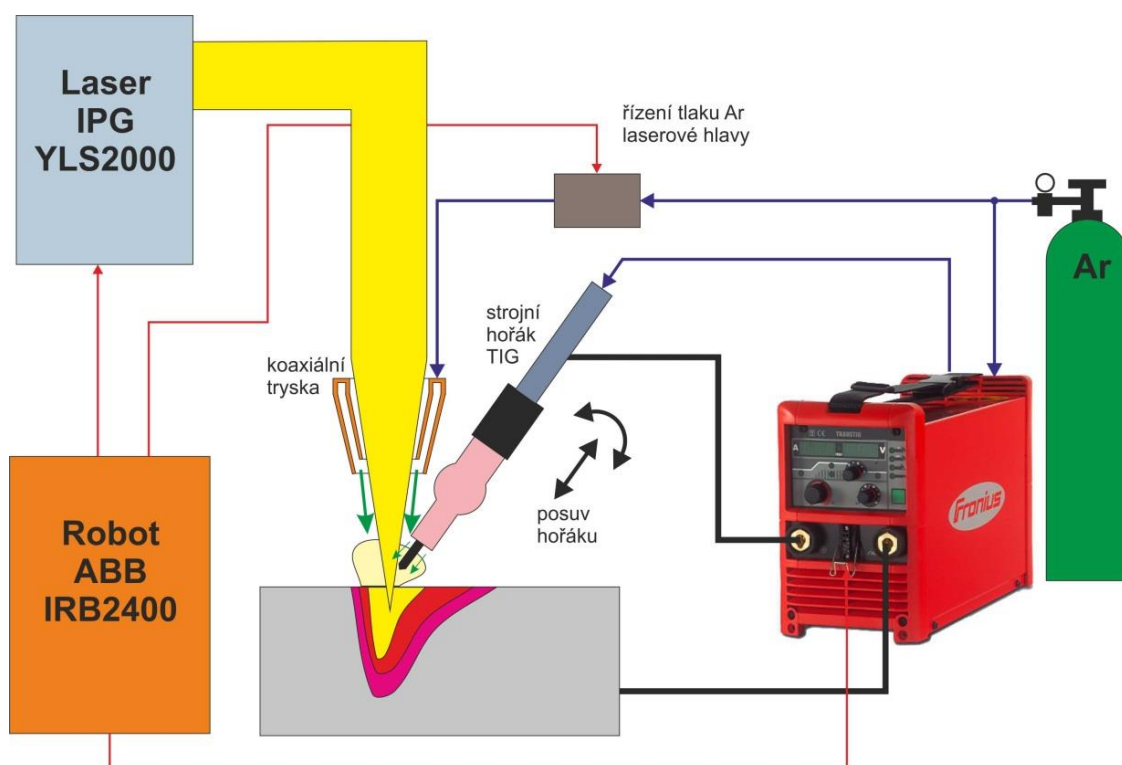
4 PRAKTICKÁ ČÁST

Práce byla provedena pomocí laseru firmy IPG s označením YLS 2000 o maximální výkonu 2000 W. Laserová hlava: Precitec YW30 s ohniskovou vzdáleností 200 mm, TIG: Fronius TransTiG 1700. Na obr. 32 je ukázaná technologie, která byla použita při provádění pokusu. Obr. 33 popisu je pracovní schéma stroje.

4.1 Použité zařízení



Obr. 32 Svařovací technika



Obr. 33 Pracovní schéma hybridního svařování

Během svařování se do základního kovu vnáší tepelná energie pro natavení kovu popřípadě přídavného materiálu. Natavením vzniká svarová lázeň, která po ztuhnutí vytvoří svarovou housenku. Vnesené teplo ve svaru značně ovlivní strukturu a mechanické vlastnosti spoje. Výpočet vneseného tepla je složitý proces. Ukázky výpočtů jsou vždy pro jeden svar ze skupiny, zbylé výsledky jsou vidět v tab. 2 [18].

4.2 Výpočet specifického vneseného tepla Q_s :

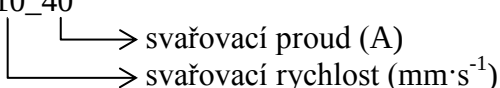
$$Q_s = \frac{\eta_{TIG} \cdot U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \text{ (kJ} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (4.1)$$

kde: Q_s ... specifické vnesené teplo [kJ·mm⁻¹]
 U ... svařovací napětí [V]
 I ... svařovací proud [A]
 μ ... koeficient účinnosti přenosu tepla [-]
 v_s ... svařovací rychlost [mm·s⁻¹]

$$Q_s = \frac{\eta_{laser} \cdot P}{10^3 \cdot v_s} \text{ (kJ} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (4.2)$$

kde: P ... výkon laseru [W]

Označení vzorku:

v10_40


Vstupní hodnoty:

$I = 10 \text{ A}$, $U = 24 \text{ V}$, $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $P = 1000 \text{ W}$, $\mu_{TIG} = 0,95$, $\mu_{laser} = 0,75$,
 $I = 20 \text{ A}$, $U = 19 \text{ V}$, $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $I = 30 \text{ A}$, $U = 14 \text{ V}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $I = 40 \text{ A}$, $U = 13 \text{ V}$.

Vzorek č. 1

$$Q_{s1} = \frac{\eta_{laser} \cdot P}{10^3 \cdot v_s} = \frac{0,75 \cdot 1000}{10^3 \cdot 10} = 0,075 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vzorek č. 7

$$Q_{s7} = \frac{\eta_{TIG} \cdot U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} + \frac{\eta_{laser} \cdot P}{10^3 \cdot v_s} = \frac{0,95 \cdot 19 \cdot 20}{10^3 \cdot 20} + \frac{0,75 \cdot 1000}{10^3 \cdot 20} = 0,049 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vzorek č. 13

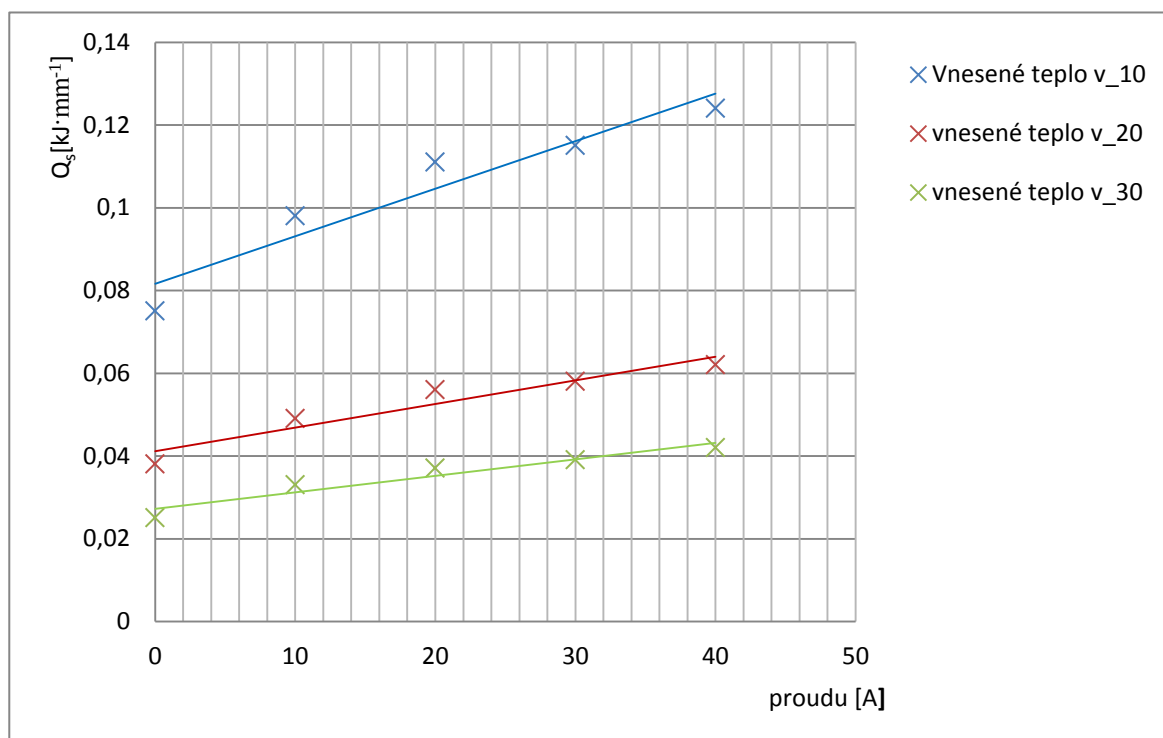
$$Q_{s13} = \frac{\eta_{TIG} \cdot U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} + \frac{\eta_{laser} \cdot P}{10^3 \cdot v_s} = \frac{0,95 \cdot 24 \cdot 10}{10^3 \cdot 30} + \frac{0,75 \cdot 24 \cdot 10}{10^3 \cdot 30} = 0,037 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tabulka obsahuje vypočtené hodnoty specifické vnesené teplo Q_s . Z výsledků vyplývá, že největší vnesené teplo je při rychlosti hybridním svařování za použité rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a použitým proudem $I = 40 \text{ A}$. Nejmenší specifické vnesené teplo je zjištěno při svařování samostatným laserem.

Tab. 2 Hodnoty vneseného tepla při přípravách vzorků

číslo	Označení svaru	Q_s [kJ · mm ⁻¹]	číslo	Označení svaru	Q_s [kJ · mm ⁻¹]	číslo	Označení svaru	Q_s [kJ · mm ⁻¹]
č. 1	v10_0	0,075	č. 6	v20_0	0,038	č. 11	v30_0	0,025
č. 2	v10_10	0,098	č. 7	v20_10	0,049	č. 12	v30_10	0,033
č. 3	v10_20	0,111	č. 8	v20_20	0,056	č. 13	v30_20	0,037
č. 4	v10_30	0,115	č. 9	v20_30	0,058	č. 14	v30_30	0,039
č. 5	v10_40	0,124	č. 10	v20_40	0,062	č. 15	v30_40	0,042

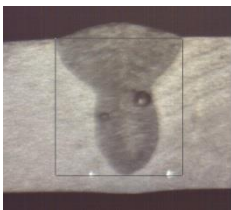
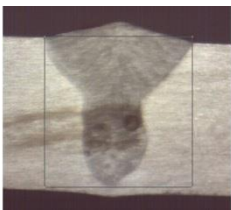
Na obr. 34 je vidět graf znázorňující nárůst specifického vneseného tepla při různých rychlostech svařování. Největší nárůst vneseného tepla je při rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 34 Graf hodnot specifické vnesené teplo Q_s

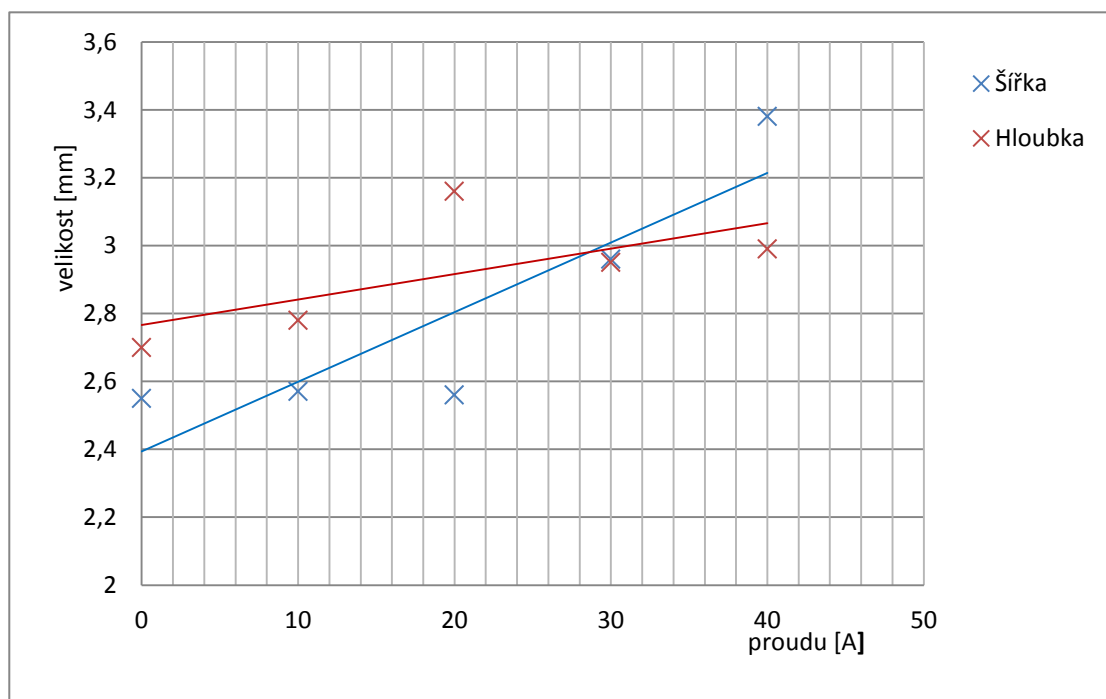
4.3 Měření geometrie svaru

Všechny obrázky byly pořízené pomocí mikroskopu SMZ-168 a vyhodnocené v programu Motic images plus 2.0. Na obr. 35 je vidět skupina svarů. Nejmenší geometrické parametry to je hloubka a šířka tavné lázně má svar provedený samostatný laserem. Největší geometrické parametry má svar provedený hybridním svařováním o rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a svařovacím proudem $I = 40 \text{ A}$.

$v10_0$	$v10_10$	$v10_20$	$v10_30$	$v10_40$
Svar provedený samostatným laserem	Svar provedený laser- TIG $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 10 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 20 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 30 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 40 \text{ A}$
				
Width: 2,55 mm Height: 2,70 mm Area: 6,87Sqmm Perimeter: 10,49mm	Width: 2,57 mm Height: 2,78 mm Area: 7,14Sqmm Perimeter: 10,69mm	Width: 2,56 mm Height: 3,16 mm Area: 8,08Sqmm Perimeter: 11,44mm	Width: 2,96 mm Height: 2,95 mm Area: 8,73Sqmm Perimeter: 11,82mm	Width: 3,38 mm Height: 2,99 mm Area: 10,11Sqmm Perimeter: 12,75mm

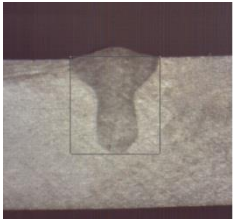
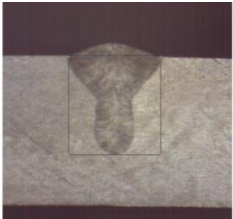
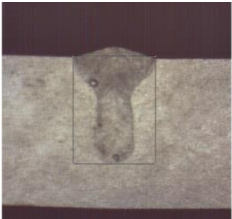
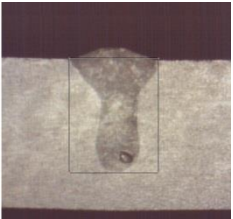
Obr. 35 Skupina svárů při rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Z naměřených hodnot vyplývá, že se zvyšujícím se proudem roste šířka tavné lázně. Hloubka penetrace se dále zvětšuje jen pozvolna. To je způsobeno tím, že maximální tloušťka plechu je jen 3 mm. Na obr. 36 je vidět graf hodnot.



Obr. 36 Graf hodnot geometrie svaru při rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na proudě

Na obr. 37 je vidět druhá skupina svarů. Nejmenší hloubka penetrace je u prvního svar, který byl provedený samostatným laserem. Největší hloubka je u laser- TIGu s proudem $I = 40$ A.

v20_ 0	v20_ 10	v20_ 20	v20_ 30	v20_ 40
Svar provedený samostatným laserem	Svar provedený laser- TIG $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 10 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 20 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 30 \text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 40 \text{ A}$
				
Width: 1,82 mm Height: 1,94 mm Area: 3,54Sqmm Perimeter: 7,53mm	Width: 1,88 mm Height: 1,96 mm Area: 3,69Sqmm Perimeter: 7,68mm	Width: 1,93 mm Height: 2,10 mm Area: 4,05Sqmm Perimeter: 8,06mm	Width: 1,67 mm Height: 2,14 mm Area: 3,58Sqmm Perimeter: 7,63mm	Width: 1,81 mm Height: 2,29 mm Area: 4,15Sqmm Perimeter: 8,20mm

Obr. 37 Skupina svarů při rychlosti $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Pro hodnocení šířky tavné lázně použijeme statistické analýzy k hodnocení hrubé chyby měření. Analýzy jsou použity, protože by šířka tavné lázně měla mít také rostoucí charakter, jako má přímka penetrace. Pro hodnocení použijeme Grubbsův (T) a Dean-Dixonův (Q) test. Jestliže $T_1 \geq T_\alpha$ a $Q_1 \geq Q_\alpha$ výsledek je odlehlý. T_α a G_α jsou kritické hodnoty z přílohy č.1. Na obr. 38 je vidět graf hodnot.

Vstupní hodnoty: 1,67; 1,81; 1,82; 1,88; 1,93

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1,82+1,88+1,93+1,67+1,81}{5} = 1,82 \quad (4.3)$$

kde: x ... aritmetický průměr [-]

n ... počet měření [-]

x_i ... měřená veličina [-]

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,088 \quad (4.4)$$

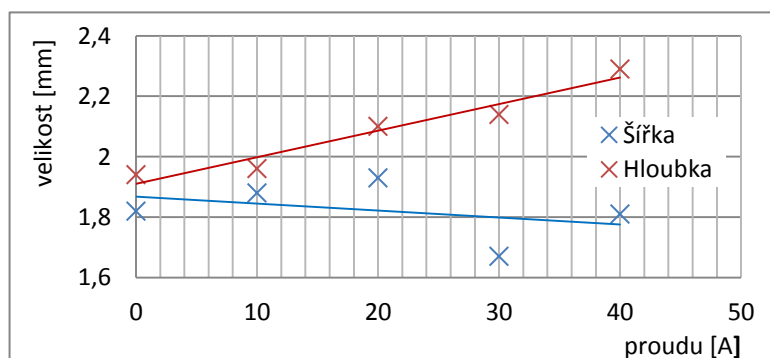
$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_{(1)}}{s} = \frac{1,82 - 1,67}{0,088} = 1,705 \quad (4.5)$$

$$Q_1 = \frac{x_{(n)} - x_{(n-1)}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{1,81 - 1,67}{1,93 - 1,67} = 0,538 \quad (4.6)$$

$$T_1 \leq T_\alpha \rightarrow 1,705 \leq 1,869$$

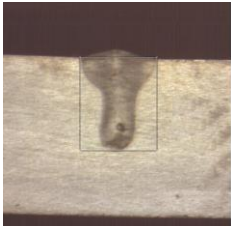
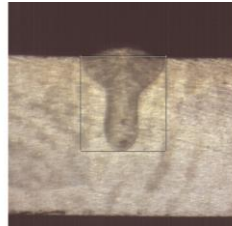
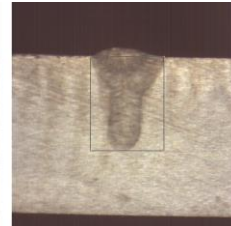
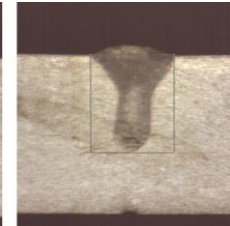
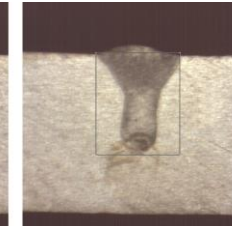
$$Q_1 \leq Q_\alpha \rightarrow 0,538 \leq 0,642$$

Vypočtené veličiny T_1 a Q_1 jsou menší než T_α a Q_α z čehož vyplývá, že podezřelá hodnota 1,67 mm patří mezi soubor hodnot a není to hrubá chyba měření. Pro přesnější zjištění průběhu přímky by bylo potřebné více pokusů a měření.



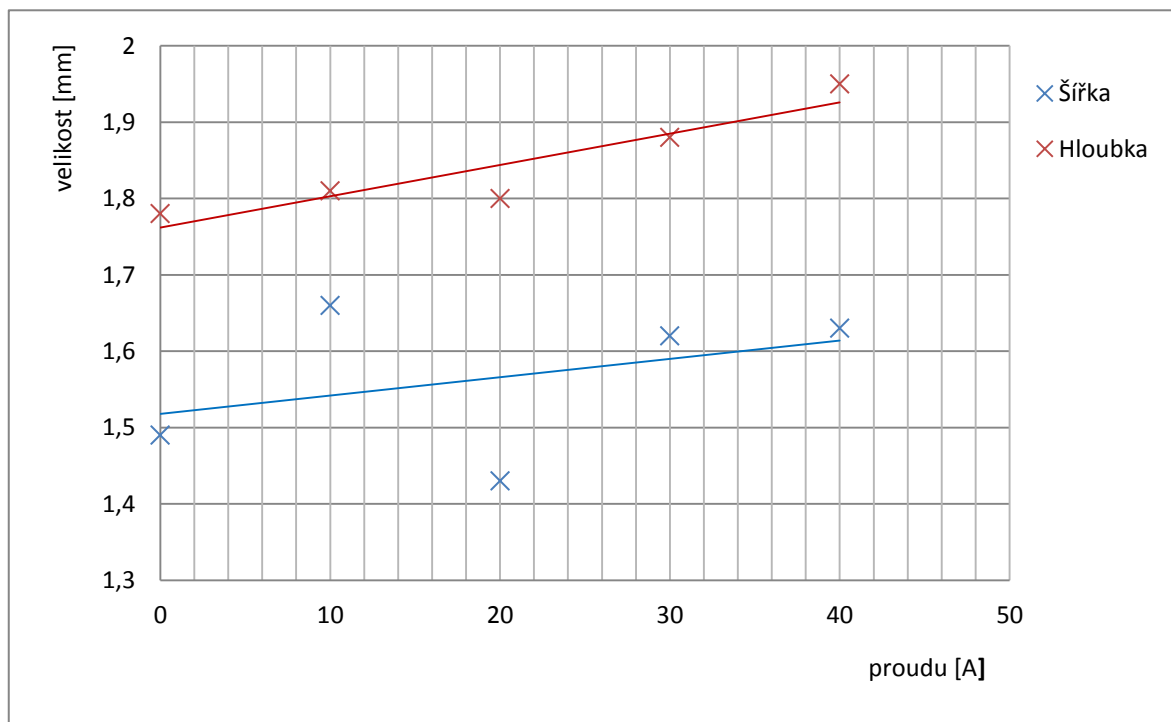
Obr. 38 Graf hodnot geometrie svarů při rychlosti $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na proudu

Na obr. 39 je vidět třetí skupina svarů. Nejmenší hloubku penetrace má zase svar provedený samostatným laserem. Největší penetrace je při hybridním svařování s proudem $I=40\text{A}$.

$v30_0$	$v30_10$	$v30_20$	$v30_30$	$v30_40$
Svar provedený samostatným laserem	Svar provedený laser- TIG $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ $I=10\text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ $I=20\text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ $I=30\text{ A}$	Svar provedený laser- TIG $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ $I=40\text{ A}$
				
Width: 1,49 mm Height: 1,78 mm Area: 2,65 Sqmm Perimeter: 6,54mm	Width: 1,66 mm Height: 1,81 mm Area: 3,00Sqmm Perimeter: 6,94mm	Width: 1,43 mm Height: 1,80 mm Area: 2,58Sqmm Perimeter: 6,46mm	Width: 1,62 mm Height: 1,88 mm Area: 3,04Sqmm Perimeter: 7,00mm	Width: 1,63 mm Height: 1,95 mm Area: 3,18Sqmm Perimeter: 7,16mm

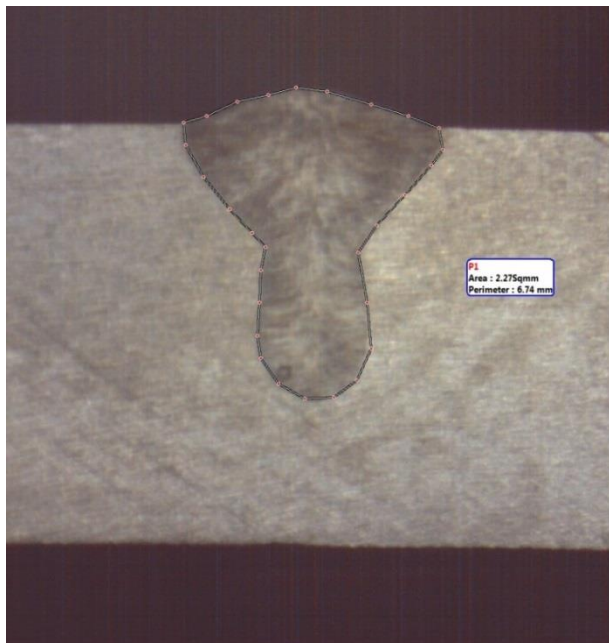
Obr. 39 Skupina svaru při rychlosti $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Šířka tavné lázně má rostou charakter, jak je vidět na obr. 40, na kterém je graf hodnot. Hodnoty 1,43 mm a 1,66 mm, které jsou podezřelé, také patří mezi soubor hodnot. K ověření hodnot byly zase použité výpočty Grubbsův (T) a Dean-Dixonův (Q) test.



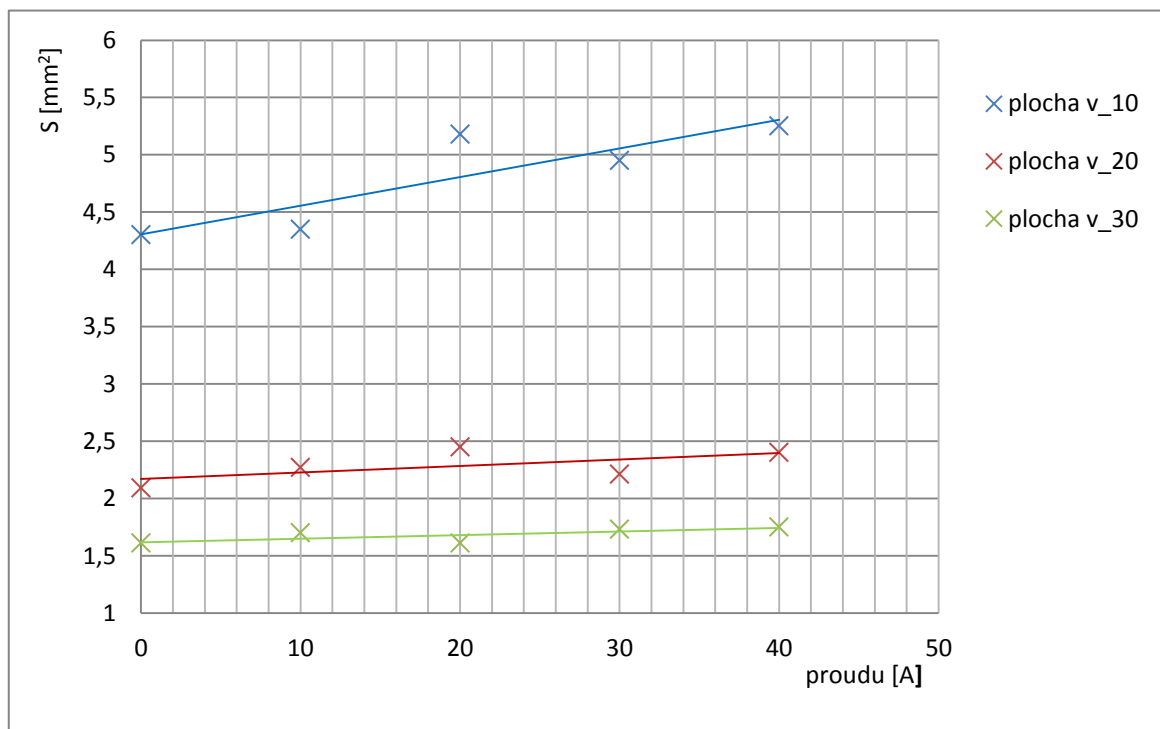
Obr. 40 Graf hodnot geometrie svaru při rychlosti $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v závislosti na proudu

Na obr. 41 je ukázáno, jak se zjišťovala plocha vytvořená hybridním svařováním. V programu Motic images plus 2.0 se pomocí polygonové křivky obtáhla svarová lázeň a program sám vypočítal plochu v mm^2 .



Obr. 41 Ukázka určení plochy

Obr. 42 znázorňuje rostoucí plochu při zvětšování proudu I [A]. Nejvýraznější nárůst plochy je u rychlosti $v = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Zatímco u rychlostí $v = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ se plocha zvětšuje jen mírně.



Obr. 42 Graf velikosti plochy v závislosti na proudu

5 ZÁVĚRY

Cílem bakalářské práce bylo seznámení se s novou technologií ve svařování a získání geometrických parametrů svařování u oceli jakosti 17 240 tloušťky 3 mm a přiřadit je k procesním parametrům.

Na zkoušeném materiálu bylo provedeno celkem patnáct svarů. Svary byly provedeny při svařovacích rychlostech $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ s měnícím se svařovacím proudem. Hodnoty svařovacího proudu byly $I = 10 \text{ A}$, $I = 20 \text{ A}$, $I = 30 \text{ A}$, $I = 40 \text{ A}$, přičemž první svár ze skupiny byl proveden samostatným laserem. Vzorky byly podrobeny metalografické analýze. Výsledky ukázaly, že největší geometrie svaru je při $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $I = 40 \text{ A}$, kdy bylo dosaženo nejhlubší a nejširší tavné lázně o největší ploše. Naopak při rychlosti $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a použití samostatného laseru se docílilo nejmenších parametrů svařování. Jako optimální parametry byly zvoleny $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $I = 20 \text{ A}$, kdy měla svarová lázeň vyhovující vlastnosti a nebyly zaznamenány žádné vady.

Pro přesný průběh přímky u obr. 38, na kterém je znázorněn graf hodnot geometrie svaru, by bylo potřebné více pokusů a měření. Záporná směrnice přímky byla způsobena odchylkami při měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RETECON (PTY) LTD [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.retecon.co.za/retecon/sheetmetal/laser-welding/>
2. DENNEY P., *HYBRID LASER ARC WELDING: HAS ITS TIME ARRIVED?* [online]. 2011 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-1/features/hybrid-laser-arc-welding-has-its-time-arrived.html>
3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
4. *Laserové svařování* [online]. 2005 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
5. Technical information : Laser processing CO2 laser [online]. Ditzingen : Technical documentation of TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2007 [cit. 2010-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.trumpf.com>>
6. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_pr_umyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
7. KUBÍČEK J., MRŇA L.: *Technické aspekty svařování laserem* [online]. [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: <http://svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>
8. KESSE, Martin Appiah. *Laser-TIG hybrid welding process* [online]. 2013 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2>
9. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laserů v průmyslu*. Plzeň: Tribun EU, 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.
10. *Svařování Laser- Hybridem* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-04.pdf>
11. *Poserus* [online]. 2008 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=10661>
12. DULA, Jan. *Sbližování teorie s praxí* [online]. 2012 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>
13. *Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
14. *Problémy při obloukovém svařování: Příčiny vad a jejich odstranění* [online]. Vamberk [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/defects_cz.pdf

15. *Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. 2008 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm
16. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*, Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
17. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. 1234 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
18. MÁŠOVÁ, PAVLA. *MOŽNOSTI REGULACE VNESENÉHO TEPLA - EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ*. Brno, 2011. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18948/2011_DP_M%C3%A1%C5%A1ov%C3%A1_%20Pavla_101751.pdf?sequence=1. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc
19. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf
20. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: *Laserové technologie*, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
21. KŘIVAN, Miloš. *Simulace geometrie key hole v závislosti na svařovacích parametrech při laserovém penetračním svařování*. [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/20836/2013_DP_Milos_Krivan_115748.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Vysoké učení technické.
22. KOLAŘÍK, Ladislav. *Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/zkousky_svaru_ndt.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
I	svařovací proud	[A]
P	výkon laseru	[W]
Q_s	specifické vnesené teplo	[kJ · mm ⁻¹]
Q_α	kritická hodnota Dean-Dixonův (Q) test	[-]
T_α	kritická hodnota Grubbsův (T) test	[-]
U	svařovací napětí	[V]
d	průměr zaměřeného svazku v ohnisku	[mm]
g_p	podélný rozměr ohniskové oblasti	[mm]
g_a	aktivní úsek laseru	[mm]
v_s	svařovací rychlost	[mm · s ⁻¹]
μ	koefficient účinnosti přenosu tepla	[-]
β	úhel fokusace	[°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Laserová technika [1, 2]	9
Obr. 2 Ukázka principu svařování TIG [3]	10
Obr. 3 Schéma laserů [6]	11
Obr. 4 Laserová kavita Nd:YAG laseru [6]	12
Obr. 5 Schéma laserové diody [6]	12
Obr. 6 Schéma diskového laseru [6]	13
Obr. 7 Schéma vláknového laseru [6]	13
Obr. 8 Režimy laserového paprsku [19]	14
Obr. 9 Laserová svařovací hlava [5]	14
Obr. 10 Závislost hloubky na poloze ohniska [20]	15
Obr. 11 Geometrické parametry laserového svazku [20]	15
Obr. 12 Princip hybridní svařování [7]	16
Obr. 13 Sestavy procesu hybridního svařování [8]	17
Obr. 14 Charakteristika proudu a napětí [8]	18
Obr. 15 Porovnání hloubky průvaru při různých rychlostech [8]	18
Obr. 16 Tvar špičky elektrody [8]	19
Obr. 17 Velikost šířky a hloubky svaru v závislosti na rychlosti [8]	20
Obr. 18 Úhly hořáku a přídatné tyče [8]	20
Obr. 19 Závislost vzdálenosti elektrody od laseru [8]	21
Obr. 20 Mezera mezi laserem a obloukem [8]	22
Obr. 21 Tvary svaru [8]	22
Obr. 22 Ukázky svarů na Audi A8 [10]	23
Obr. 23 Ukázka kapilární kontroly [22]	24
Obr. 24 Princip metody magnetické práškové [22]	24
Obr. 25 Práce s ultrazvukovou sondou [22]	25
Obr. 26 Ukázka rentgenového odhalení vad [22]	25
Obr. 27 Schéma přípravy metalografického vzorku [15]	26
Obr. 28 Povrchové vady svaru [12]	27
Obr. 29 Vnitřní vady svaru [12]	27
Obr. 30 Vliv svařovacích parametrů [21]	28
Obr. 31 Schéma mechanismu tvorby „spikingu“ a „humpingu“ [20]	28
Obr. 32 Svařovací technika	29
Obr. 33 Pracovní schéma hybridního svařování	29
Obr. 34 Graf hodnot specifické vnesené teplo Q_s	31
Obr. 35 Skupina svarů při rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	32
Obr. 36 Graf hodnot geometrie svaru při rychlosti $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na proudu	32
Obr. 37 Skupina svarů při rychlosti $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	33
Obr. 38 Graf hodnot geometrie svaru při rychlosti $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na proudu	33
Obr. 39 Skupina svarů při rychlosti $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	34
Obr. 40 Graf hodnot geometrie svaru při rychlosti $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na proudu	34
Obr. 41 Ukázka určení plochy	35
Obr. 42 Graf velikosti plochy v závislosti na proudu	35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Průměry elektrod s doporučeným proud [8].....	19
Tab. 2 Hodnoty vneseného tepla při přípravách vzorků.....	31

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 Kritické hodnoty T_α a Q_α pro vylučování odlehlých výsledků
Příloha č.2 Analýza dat šířky tavné lázně (obr. 38)

Kritické hodnoty T_α a Q_α pro vylučování odlehlých výsledků.

Počet stanovení n	T_α		Q_α	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
3	1,412	1,416	0,941	0,988
4	1,689	1,723	0,765	0,889
5	1,869	1,955	0,642	0,760
6	1,996	2,130	0,560	0,698
7	2,093	2,265	0,507	0,637
8	2,172	2,374	0,468	0,590
9	2,237	2,464	0,437	0,555
10	2,294	2,540	0,412	0,527
11	2,343	2,606		
12	2,387	2,663		
13	2,426	2,714		
14	2,461	2,759		
15	2,493	2,800		
16	2,523	2,837		
17	2,551	2,871		
18	2,557	2,903		
19	2,600	2,932		
20	2,623	2,959		

VÝSLEDEK					
<i>Regresní statistika</i>					
Násobné R			0,537		
Hodnota spolehlivosti R			0,289		
Nastavená hodnota spolehlivosti R			-0,067		
Chyba stř. hodnoty			0,117		
Pozorování			4,000		
ANOVA					
	<i>Rozdíl</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Významnost F</i>
Regrese	1,000	0,011	0,011	0,811	0,463
Rezidua	2,000	0,027	0,014		
Celkem	3,000	0,038			
	<i>Koeficienty</i>	<i>Chyba stř. hodnoty</i>	<i>t Stat</i>	<i>Hodnota P</i>	
Hranice	1,940	0,143	13,575	0,005	
0,000	-0,005	0,005	-0,901	0,463	
<i>Dolní 95%</i>	<i>Horní 95%</i>	<i>Dolní 95,0%</i>	<i>Horní 95,0%</i>		
1,325	2,555	1,325	2,555		
-0,027	0,018	-0,027	0,018		
REZIDUA					
<i>Pozorování</i>	<i>Očekávané 1,82</i>	<i>Rezidua</i>	<i>Normovaná rezidua</i>		
1,000	1,893	-0,013	-0,136		
2,000	1,846	0,084	0,882		
3,000	1,799	-0,129	-1,354		
4,000	1,752	0,058	0,609		