



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PROBLEMATIKA METODY SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRID

ISSUES OF THE LASERHYBRID WELDING METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Znášik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Samuel Znášik**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček, IWE**
Akademický rok: 2022/23

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:

Problematika metody svařování LaserHybrid

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laserové svařování je technologie používaná především u tenkých materiálů. Metodou LaserHybrid můžeme svařovat i větší tloušťky s velmi kvalitním povrchem svarů. BP je zaměřená na rozbor techniky a využití LaserHybridu včetně jeho využití pro velké tloušťky.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování literární studie zaměřené na řešenou problematiku,
- rozbor materiálové svařitelnosti LaserHybridem,
- provedení experimentu,
- technické vyhodnocení svarových spojů.

Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

BENKO,B. a kol. Laserové technológie, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-227-1425-9.

TURŇA,M. Špeciálne metódy zvarania, 1vyd. ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce pojednává o problematice využití zvarování pomocí Laserhybridu pro energetický průmysl, kde by kombinace laseru a oblúku mohla napomôct' kvalitnejším zvarom odolným voči agresívnemu prostrediu, korózii a oxidácií. Sú preskúmané metódy, ktorý hybridný proces vytvárajú ako aj možné náhrady metódy MIG a MAG, ako aj rôzne usporiadania a ich možný vplyv na proces. V práci je tiež prezentované možné využitie technológie pre hyperbarické zvarovanie. Experimentálna časť je venovaná zvarom žiaruvzdornej martenzitickej ocele využívanej v energetike pre výrobu parných turbín. Boli skúmané štruktúry zvarov pri rozdielnych parametroch a porovnávané tvrdosti.

Kľúčové slová

laser, laserhybrid, MIG, MAG, PMC, CMT, hyperbarické zvarovanie

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of using LaserHybrid welding for the energy industry where the combination of laser and arc could facilitate higher quality welds resistant to aggressive environments, corrosion and oxidation. The methods that the hybrid process produce as well as possible replacements for the MIG and MAG methods are explored, as well as the different configurations and their possible impact on the process. The possible use of the technology for hyperbaric welding is also presented. The experimental part is devoted to the welding of refractory martensitic steel used in the power industry for the production of steam turbines. Weld structures at different parameters were investigated and hardnesses were compared.

Keywords

laser, laserhybrid, MIG, MAG, PMC, CMT, hyperbaric welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZNÁŠIK, Samuel. *Problematika metody svařování LaserHybrid* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149264>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PREHLASUJEM

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma Problematika metody svařování LaserHybrid vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

Brno, 23.05.2023

Miesto, dátum

Samuel Znášik

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi a doc. RNDr. Liborovi Mrňovi za rady a cenné pripomienky, ktoré mi poskytli pri vypracovávaní bakalárskej práce. Tiež by som chcel poďakovať svojim rodičom za podporu pri celom štúdiu.

OBSAH

Zadanie práce

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Podakovanie

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Varianty riešenia výroby	11
2 TEÓRIA ZVÁRANIA.....	13
2.1 Metódy MIG/MAG	13
2.2 CMT (Cold metal transfer).....	15
2.3 PMC (Pulse Multi Control)	15
2.4 Laser	16
2.4.1 Typy laserov	18
2.5 Laser Hybrid.....	20
2.5.1 Zváracia hlava.....	20
2.5.2 Možnosti usporiadania Laserhybridu	21
2.6 Hyperbarické zváranie.....	23
2.7 Hyperbarické zváranie LaserHybridom	25
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	28
3.1 Zvárací proces a použité zariadenia	30
3.2 Metalografické skúšky	32
3.3 Makroštruktúra zvarov	34
3.4 Mikroštruktúra zvarov	38
3.5 Vyhodnotenie tvrdosti zvaru	39
ZÁVER.....	40
Zoznam použitých zdrojov	
Zoznam použitých symbolov a skratiek	
Zoznam príloh	

ÚVOD

Výroba v strojárstve sa rozdeľuje na štyri hlavné oblasti, a to obrábanie, tváranie, zlievanie a zváranie. Práve zváranie ako jedna z hlavných strojárskych technológií je významnou a v dnešnej dobe sa dá povedať neoddeliteľnou súčasťou priemyslu a služieb využívaná pre nerozoberateľné spojovanie materiálov prevažne v automobilovom, lodnom a energetickom priemysle, stavebníctve ale nájde použitie napríklad aj pre umeleckú činnosť. Pri zvyšovaní požiadavkou na kvalitu zvarov, akosť, zdravie pracovníkov a produktivitu sa v posledných rokoch začali vyvíjať a vznikajú technológie, ktoré sú vytvorené na základe nových objavov na poli vedy alebo kombinujú a vylepšujú už používané technológie. [1; 2]

Pre naplnenie týchto náročnejších požiadavkou na výrobu sme mohli spozorovať vznik napríklad technológie 3D tlače kovov, zváranie trením alebo laserovému zváraniu. Práve technológia laseru sa začala ďalej rozvíjať a kombinovať s klasickými technológiami a dali tak vzniknúť technológii laserhybridu (obr. 1). [3]

Technológia laserhybridu bola objavená už v deväťdesiatych rokoch minulého storočia avšak dlhšiu dobu jej spoločnosť nevenovala moc pozornosti. Táto skutočnosť sa zmenila v roku 1998 kedy výrobca automobilov Audi spolu s výrobcou zváracej techniky Fronius skonštruovali prvé zariadenie spájajúce metódu laseru a oblúkového zvárania MIG/MAG. Najmä vďaka svojim výhodným vlastnostiam začala byť najmä v posledných desaťročiach využívaná vo viacerých oblastiach priemyslu či už lodnom, automobilovom, poľnohospodárskom alebo aj v energetickom priemysle. [4; 5]

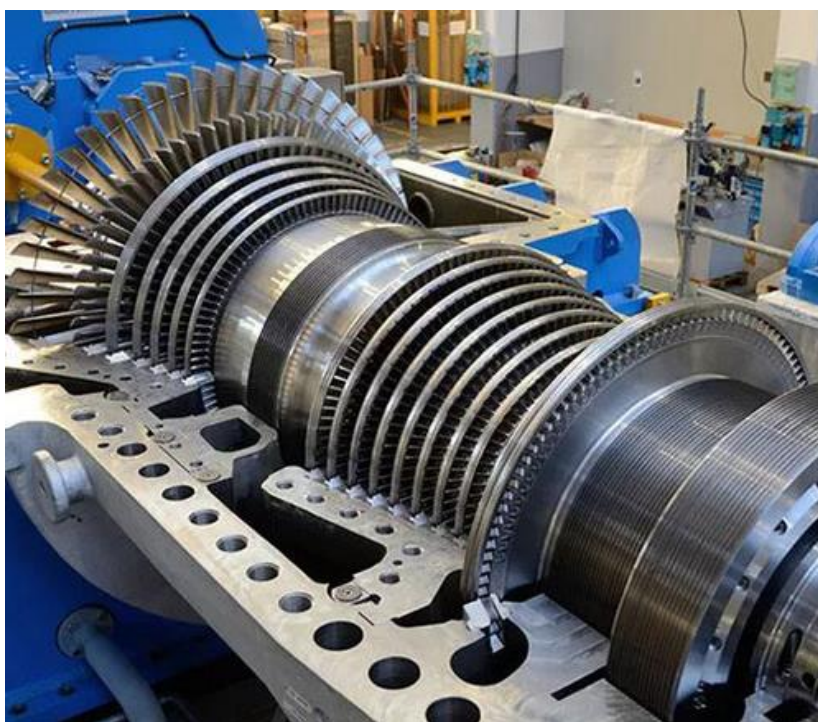


Obr. 1 Zvárací robot pre LaserHybrid [6].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zváranie je hlavnou súčasťou energetického priemyslu, zohráva dôležitú úlohu pri výrobe, opravách a servise rôznych energetických zariadení a komponentov ako napríklad pri výstavbe elektrárni, ropných rafinérií alebo parných turbín. Parné turbíny (obr. 2) sú kľúčovým zariadením energetiky, ktoré premieňajú tepelnú energiu na mechanickú a tým sú poháňané generátory na výrobu elektrickej energie. Je to typ rotačného motora, ktorý používa energiu pary na otáčanie hriadele. Používajú sa v uhoľných, jadrových elektrárnach alebo aj elektrárnach s kombinovaným cyklom. [7; 8]

Konštrukcia, podmienky a údržba sú len jednou časťou, ktoré ovplyvňujú výkon a účinnosť turbín. Opravy, údržba ako aj ich výroba je vo veľkej miere závislá od zvarovania. Pre zvary je často potrebné aby odolávali vysokým teplotám, tlakom, mechanickému namáhaniu a chránili štrukturálnu integritu. Parné turbíny sa skladajú z viacerých častí ako sú rotor, lopatky, plášť a potrubné systémy. [7; 8]



Obr. 2 Parná turbína [9].

Pre výrobu turbín je potrebné použitie materiálov, ktoré znesú extrémne teplo a to až do výšky 650 °C, extrémny tlak, mechanické namáhanie, majú dobrú oxidačnú odolnosť a odolnosť voči korózii. Zváraný materiál pre experimentálnu časť bol vybraný X12Cr13 žiarupevná, martenzitická oceľ odolná voči korózii využívaná v energetike pre lopatky parných turbín. Mechanické vlastnosti sú uvedené v tabuľke 1 a chemické zloženie v tabuľke 2. [10]

Tab. 1 Mechanické vlastnosti ocele X12Cr13 [11].

Medze klzu [MPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Minimálne predĺženie [%]	Tvrdosť [HB]
Min	-	Min	Min
450	650 - 850	15	220

Tab. 2 Chemické zloženie ocele X12Cr13 [12].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	P [%]	S [%]
0,09	0,39	0,64	12,5	0,4	0,06	0,04	0,021	0,001

1.1 Varianty riešenia výroby

V energetike sa často používajú najrôznejšie metódy zvárania pre rôzne účely, V prípade zvárania dielov parných turbín je nutné uvažovať s metódami, ktoré tvoria silné, pevné zvary a dokážu zvärať žiarupevné oceli. Medzi možnými metódami môžeme uvažovať [2]:

- Laser – používa sa najmä u dielov a súčasti kde je nutné dbať na presné a kvalitné spoje s nízkou tepelnou deformáciou okolného materiálu. Pri zváraní laserom (obr. 3) je lúč zaostrený na povrch súčastí, materiál sa v okolí začne taviť a miesiť pozdĺž spoja, a po následnom ochladnutí vzniká spoj. Metóda by nebola vhodná z dôvodu tvorby podrezu tvoreného na zvare, nízkeho prienik do základného materiálu, menšiu šírku zváranej húsenice, čo spôsobuje nižšiu pevnosť v ťahu a menšie hodnoty mechanických vlastností. [2; 13]

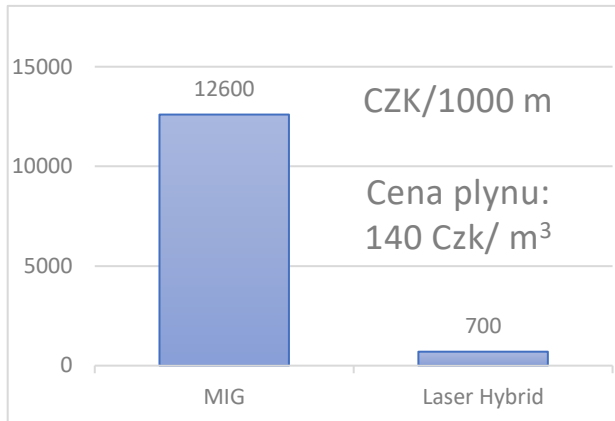


Obr. 3 Metóda zvárania laserom [14].

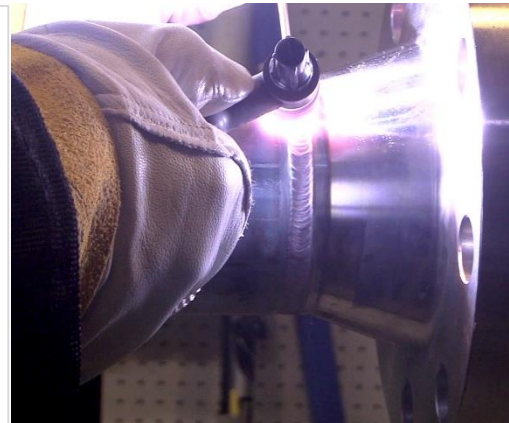


Obr. 4 Metóda SMAW [15].

- SMAW (Shielded Metal Arc Welding 111) – je metóda používaná pre zváranie trúbiek (obr. 4), pri ktorej nie je potrebné použitie žiadneho tavidla alebo ochranného plynu, takže zväracie zariadenie je jednoduché a prenosné. Kov sa zvära tavením elektród teplom generovaným elektrickým oblúkom. Najväčšou nevýhodou je jeho nízka rýchlosť zvárania čo znižuje produktivitu a predlžuje čas práce. [2; 16]
- MIG (Metal Inert Gas 136) – vyššie produktívna metóda využívajúca prenos tepla pomocou kontinuálne tavidelnej elektródy a poskytujúcej ochranu tavného kúpeľa pred oxidáciou vďaka inertnému ochrannému plynu. Veľkou nevýhodou je vysoké využitie ochranného plynu. pre porovnanie viz obr. 5 voči metóde laserhybridu, a je potrebná lepšia kontrola zväracích vlastností pre dosiahnutie kvalitného zvaru. [2; 4; 17]
- TIG (Tungsten Inert Gas 141) – proces pri ktorom sa produkujú veľmi kvalitné zvary (obr. 6), čo je ideálne pre kritické a vysoko presné zväracie práce. Metóda funguje na princípe vytvoreného elektrického oblúku medzi volfrámovou elektródou a materiálom, ktorý je chránený ochranným plynom, zložený prevažne zo zmesi argónu a hélia alebo čistého argónu. Nevýhodou je však nízka rýchlosť odtavovania a vyššie náklady na zariadenie ako pri iných metódach. [2; 4; 18]



Obr. 5 Cenové porovnanie využitého plynu [21].

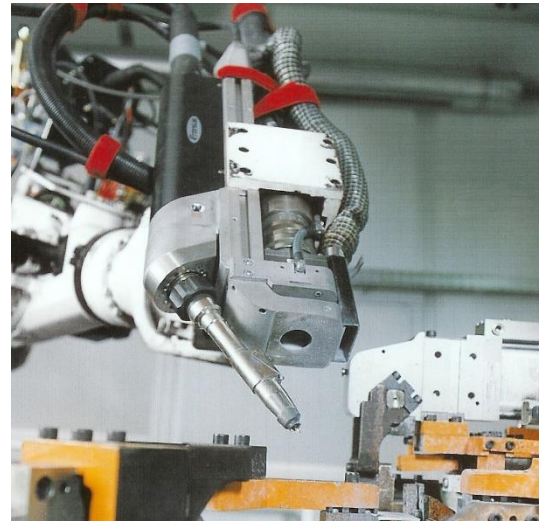


Obr. 6 Metóda TIG [19].

- LaserHybrid – metóda spája technológiu laseru s procesom zvarania MIG/MAG a podobne ako u zvarania kľúčovou dierkou sa u hybridného zvarania používa laserový lúč k dosiahnutiu dostatočnej hĺbky zvaru, hlavne pri veľkých hrúbkach materiálu. Chýbajúci materiál je zároveň vyplnený drôtom a oblúk je chránený pred oxidáciou pomocou ochranného plynu. Na obrázkoch 7 a 8 je možné vidieť zariadenia od spoločnosti KUKA a Fronius využívajúce laserhybridu. [4; 20]



Obr. 7 Zariadenie spoločnosti KUKA [21].



Obr. 8 Zariadenie spoločnosti Fronius [4].

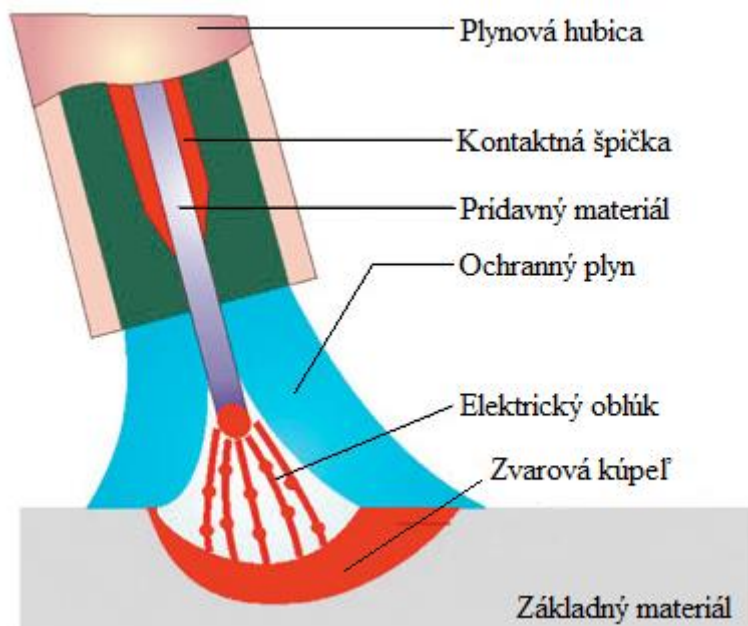
Metóda laserhybridu sa do popredia dostala hlavne vďaka kombinácii kladných vlastností zvarania pomocou elektrického oblúku a laserového zvarania ako napríklad rýchlosť, lepšia kvalita švov, stabilnejší proces a nižšia deformácia zvarného materiálu spôsobená pôsobením tepla. Zároveň sa týmto vyriešia nevýhody oboch metód kde pri zvaraní laserom sa v dôsledku malého ohniska vyskytuje malá preklenuteľnosť medzier, pri elektrickom oblúku pomalšia rýchlosť zvarania a oproti technológii MIG má menšiu spotrebu ochranného plynu ako je možné vidieť na obrázku 5. Preto pre zvolenú problematiku zvarania lopatiek parných turbín, kde sú potrebné veľmi pevné zvary s dobrými mechanickými vlastnosťami bez väčšej deformácie okolného materiálu a možnosti zvarania žiarupevných materiálov bola vybraná metóda laserhybridu. [4; 5; 20]

2 TEÓRIA ZVÁRANIA

Zváranie je základným a dôležitým prvkom v procese priemyselnej výroby, výstavby a údržby, pri ktorom sa dva alebo viaceré dielov spoja dokopy pomocou tepla, tlaku alebo ich kombináciou, čím sa medzi nimi vytvorí neoddeliteľné spojenie. Zvárací proces zahŕňa vystavenie materiálov vysokej alebo tlaku aby sa roztavenie a následné spojenie. Na použitie je k dispozícii široký výber zváracích metód, ako je oblúčkové zváranie, zváranie plynom alebo odporom. Každá technológia má svoje výhody a nevýhody a výber závisí od konkrétnej aplikácii a od zváraného materiálu. [1; 2]

2.1 Metódy MIG/MAG

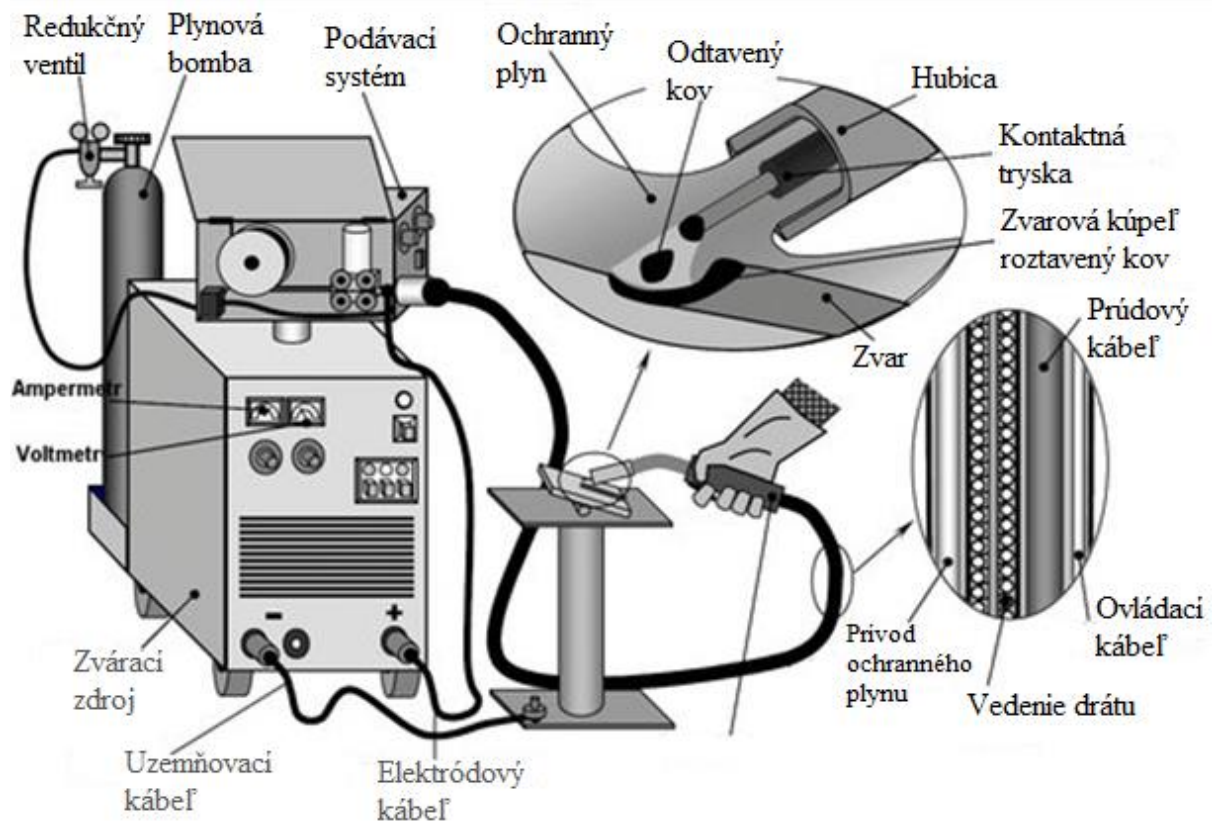
Zváracie metódy MIG/MAG sa môžu v momentálnej dobe považovať za najpoužívanejšie zváracie postupy s veľkým spektrom použitia. Technológie zvárania MIG/MAG sa dajú tiež označiť ako zváranie v ochrannej atmosfére, pre ktoré sa rozlišuje zváranie v ochrannej atmosfére inertného plynu alebo aj MIG a zváranie v ochrannej atmosfére aktívneho plynu teda MAG. Technológia MIG/MAG funguje na princípe vytvorenia oblúku medzi zváraným dielom a prídavným materiálom alebo zváracím drôtom, kde sa roztavený elektródový materiál privádza na povrch obrobku, plní zvarovú kúpeľ a tvorí spoj ako prídavný materiál. Prídavný materiál alebo drôt sa podáva z navinutej cievky podávacím mechanizmom cez horák do zvarového kúpeľa (obr. 9). Počas celého procesu je vytvorený oblúk chránený ochranným plynom, ktorý prúdi plynovou tryskou a zabraňuje prúdeniu kyslíka z okolia. Ochranný plyn tak zabraňuje oxidácii v tavnom kúpeľi a na oblúku, chráni tak proti vzdušnej vlhkosti a taktiež okolitým nečistotám. [4; 17; 22]



Obr. 9 Princíp zvárania MIG/MAG [52].

Pre zváranie metódou MAG sa používajú aktívne ochranné plyny ako čisté CO₂ a zmes plynov argón + CO₂ alebo argón + kyslík s rôznymi koncentraciami a zložením podľa zváraného materiálu. Funkciou aktívneho plynu je taktiež vstupovať do chemických reakcií v zváranom kúpeľi teda sa dá povedať, že sa aktívne podieľa na procesoch, ktoré v ňom prebiehajú. Schému zapojenia metódy MIG a MAG je možné vidieť na obrázku 10. Metóda MAG sa najčastejšie používa pre zváranie nelegovaných ocelí, nízkolegovaných ocelí ale môže sa použiť aj pri vysokolegovaných oceliach. [4; 17]

Metóda MIG na druhú stranu používa nereaktívne inertné ochranné plyny, ktoré majú iba ochrannú funkciu a teda sa nepodieľajú na chemických procesoch. Medzi inertné plyny patrí čistý argón, hélium alebo zmesi plynov hélia a argónu. Táto metóda je vhodná k zváraniu ľahkých kovov ako hliník a jeho zliatiny, zliatiny medi najmä bronz, horčík a titán. Zváranie metódami MIG/MAG je univerzálny postup, ktorý je možné použiť na rôzne materiály vrátane uhlíkovej ocele, hliníka a zliatin medi. Je ľahko automatizovateľný, vďaka čomu je vhodný pre priemerné aplikácie s vysokými objemami výroby, má nižšie nároky na čistenie strusky čo uľahčuje zváranie vo všetkých polohách. Zvárané spoje metódou MIG/MAG majú vysokú kvalitu vďaka nízkej pórovitosti, hlbokému závaru a dobrému profilu zvaru. Postup je ľahký pre obsluhu pre ľahký štart oblúku, kde nemusí dôjsť k nárazu zväracej elektródy k zváranému materiálu, je možná priama vizuálna kontrola oblúku aj zvarového kúpeľa, žiadny alebo veľmi malý rozstrek materiálu a dobrá aplikácia metódy pre robotizovaný a mechanizovaný systém zvárania. Nevýhodami metódy je hlavné vyššia nákupná cena ale aj vyššie nároky na údržbu. Pri zlej ventilácii vzniká určité riziko odfúknutia ochranného plynu. [24; 25; 26; 27]

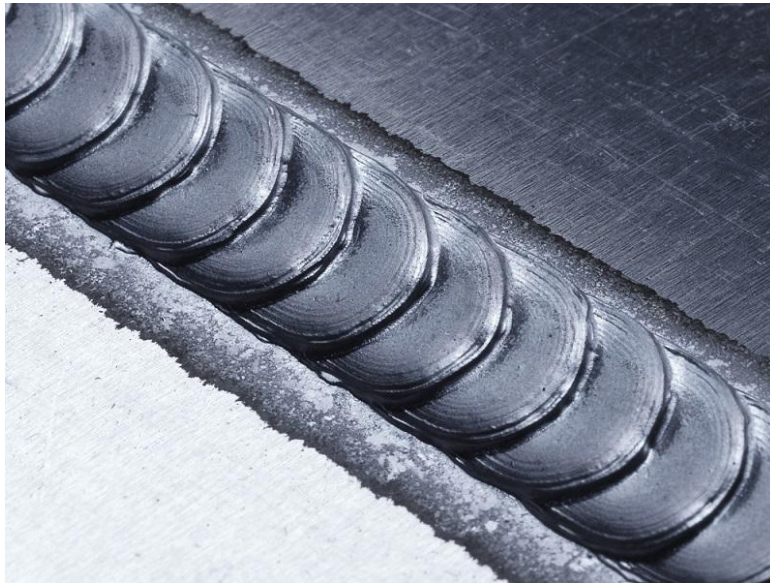


Obr. 10 Schéma zapojenia metódy MAG [23].

Metóda je aj napriek tomu široko používaný proces v odvetviach, ako je automobilový priemysel, letectvo, stavebníctvo a pri stavba lodí. Jeho všestrannosť a schopnosť zvärať rôzne materiály z neho robia obľúbenú voľbu pre mnohé aplikácie. Proces sa postupom času vyvíjal s pokrokom v technológii, ktorý viedol k vytvoreniu CMT a PMC procesov a zlepšeniu výkonu a produktivity zvárania. [24; 27]

2.2 CMT (Cold metal transfer)

Technológia zvarovania CMT má schopnosť spájať rôzne materiály, ako je ocel a hliník, čo by bolo zvyčajne ťažké dosiahnuť tradičnými metódami zvarovania, vďaka čomu sa stala populárnou voľbou pre rozličné aplikácie v rôznych priemyselných odvetviach. Zváranie metódou CMT sa vyznačuje minimálnym tepelným príkonom a stabilným oblúkom aj pri použití 100% CO_2 ochranného plynu, čím sa odlišuje od konvenčných zvaracích techník. Tento proces využíva riadený skrat na prenos tekutého kovu z elektród do materiálu, čo umožňuje presné riadenie parametrov zvarovania a vedie k menšiemu rozstreku a skriveniu, čo vedie k hladším a konzistentnejším zvarom, viz obr. 11. [4; 28]



Obr. 11 Zvar metódou CMT [27].

Presné ovládanie tiež umožňuje zváranie tenkých aj hrubších materiálov ako je hliník s minimálnym tepelným príkonom čo znižuje riziko deformácie zváraného materiálu. Zatiaľ čo štandardný proces zvarovania v inertnom plyne funguje na princípe nepretržitého skratu, proces CMT využíva nízke a vysoké prúdy v špecifických momentoch, aby sa predišlo skratom pri vysokých prúdoch. Proces CMT funguje pomocou špecializovanej zvaracej pištole, ktorá kombinuje podávač drôtu s riadením vratným pohybom elektronickej riadiacej obvodu na vytvorenie presného, nízko energetického oblúka, ktorý minimalizuje prívod tepla a zabraňuje prehriatu. Oblúk je vytvorený pulzujúcim prúdom, ktorý strieda vysoké a nízke napätie, čo umožňuje vedenie drôtu cez pištoľ s minimálnym odporom. [4; 27]

2.3 PMC (Pulse Multi Control)

Zváranie pomocou technológie PMC sa uplatnilo najmä pri presnom zvarovaní tenkých materiálov. Proces využíva kombináciu vysokofrekvenčných impulzov a nízkeho prúdu na vytvorenie presných zvarov s minimálnym tepelným príkonom. Táto technológia je užitočná obzvlášť pre materiály, ktoré sa ľahko deformujú. Použitie zahŕňa využitie mikrokontroléru na reguláciu tvaru a trvania impulzu, ako aj zvaracieho prúdu a napätia. To umožňuje presné riadenie zvaracieho procesu, zabezpečenie konzistentnej kvality zvaru a minimalizáciu rizika defektov. Jednou z hlavných výhod PMC zvarovania je schopnosť zvarať tenké materiály bez pôsobenia deformácie a prepálenia čo je užitočné najmä v odvetviach, ako je letecký priemysel, kde sa bežne používajú tenké materiály, ako sú hliníkové zliatiny a titán. Technológia sa tiež používa pri zvarovaní rôznych kovov, čo je ťažké dosiahnuť tradičnými metódami. [4; 29]

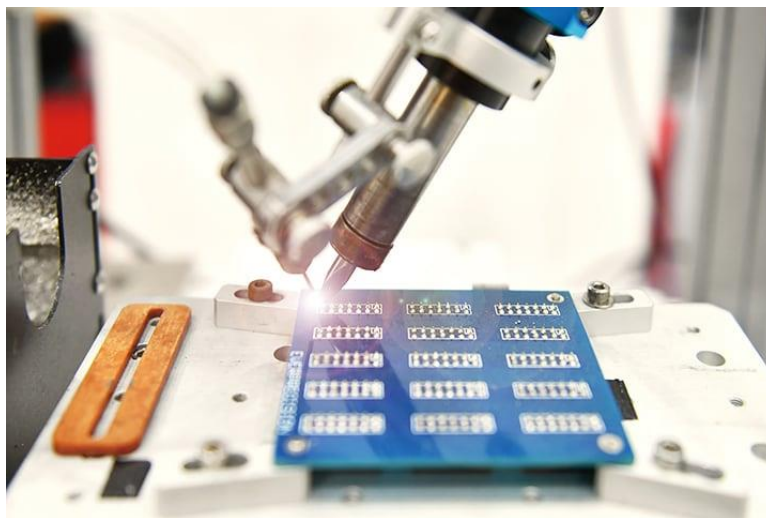
PMC ponúka nízky tepelný príkon, čo znižuje možnosť deformácie a vysoký stupeň kontroly nad procesom, čo umožňuje presnú kontrolu nad teplotou a príkonom energie počas celej doby trvania. Na obrázku 12 je vidieť zvar vytvorený procesom PMC firmy Fronius, ktorý využíva kombináciu technológií Mix, Ripple a Drive na dosiahnutie najlepších možných výsledkov. Technológia Mix kombinuje rôzne režimy zvarovania, zatiaľ čo technológia Ripple vytvára stabilný oblúk. Drive optimalizuje posuv drôtu a rýchlosť zvarovania, výsledkom čoho je vysoko efektívny proces zvarovania. [4]



Obr. 12 Zvar vytvorený technológiou PMC [4].

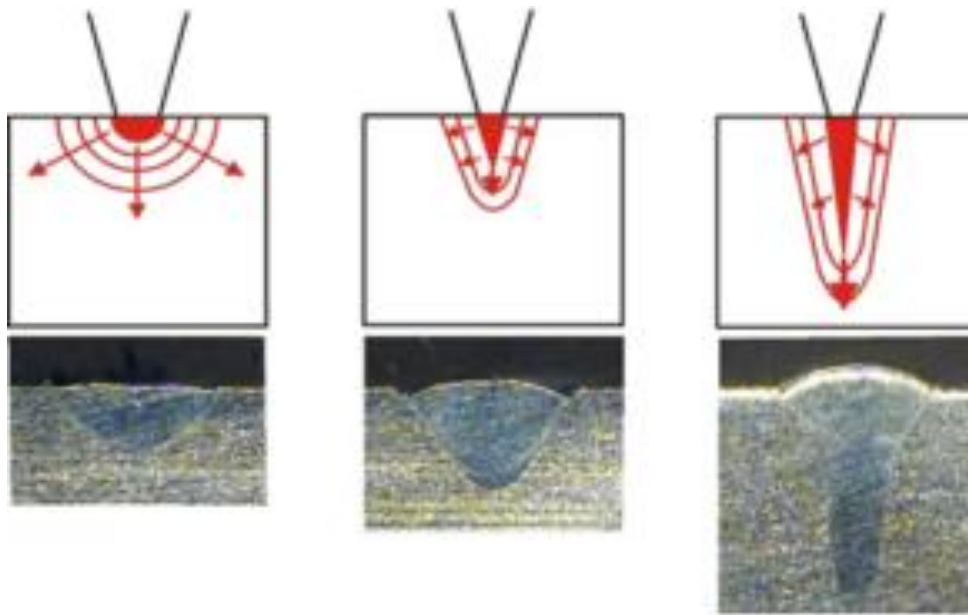
2.4 Laser

Laserové zvarovanie je moderná zváracia technika, ktorá využíva na spájanie materiálov vysoko energetické laserové lúče. Lúč roztaví materiál a výsledný zvar vznikne, keď roztavený materiál stuhne. Laserové zvarovanie sa vďaka svojej presnosti a rýchlosti používa v mnohých priemyselných odvetviach vrátane automobilového priemyslu, letectva a pre výrobu elektroniky (obr. 13). Jednou z výhod tejto metódy je jeho presnosť, Laserové lúče môžu byť zaostrené na veľmi malú veľkosť, čo umožňuje presné zvarovanie malých, zložitých častí. Táto presnosť tiež znamená, že okolo zvaru je malá zóna ovplyvnená teplom, čo znižuje riziko skrivenia a deformácie vo zváranom materiáli. [2; 13; 27; 33]



Obr. 13 Zváranie elektroniky [30].

Jednou z nevýhod laserového zvarovania je jeho cena. Laserové zvarovacie zariadenia sú drahšie a náklady na samotný laser sú často vyššie ako náklady na iné technológie a okrem iného vyžaduje kvalifikovaného operátora na nastavenie a obsluhu zariadenia, čo môže zvýšiť celkové náklady. Napriek svojej cene sa metóda bežne využíva na zvarovanie komponentov karosérie a podvozkov u automobilov alebo komponentov motora a palivových nádrží lietadiel. Existujú dva hlavné typy laserového zvarovania, kondukčný a penetračný alebo aj zvarovanie kľúčovou dierkou. Kondukčný režim zvarovania, viz obr. 14 naľavo, sa zvyčajne používa pre tenšie materiály kde je laserový lúč absorbovaný povrchom zvarovaného materiálu. Proces sa vykonáva pri nízkej hustote energie, typicky okolo $0,5 \text{ MW/cm}^2$, kde lúč zahrieva povrch materiálu kým sa nenataví a nespojí, používa sa zvyčajne pre materiály s vysokou tepelnou vodivosťou, ako je meď a hliník. [2; 13; 27; 31; 33]



Obr. 14 Režimy laserového zvarovania [32].

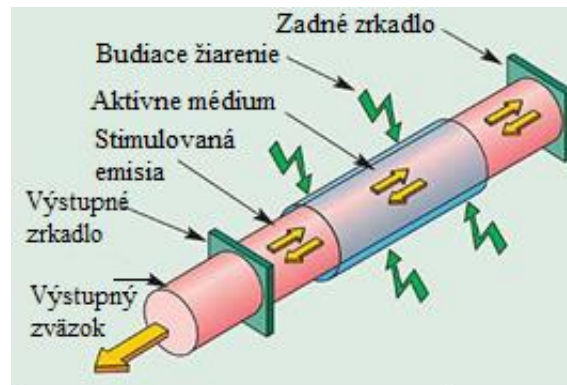
Penetračný režim alebo zvarovanie kľúčovou dierkou, viz obr. 14 napravo, sa zvyčajne využíva pre hrubšie materiály ako oceľ alebo titán, čím umožní lúču preniknúť hlbšie do materiálu. Proces zahŕňa vytvorenie kľúčovej dierky v materiály, cez ktorú prechádza laserový lúč a taví materiál. Jednou z výhod je schopnosť spájať hrubšie materiály s vysokou kvalitou a rýchlosťou čo je spôsobené najmä prienikom lúča hlboko do materiálu a vytvoreným roztaveným kúpeľom, ktorý je oveľa väčší ako samotný lúč. Výsledkom je rovnomernejšie rozloženie tepla materiálu, čo napomáha predchádzať deformáciám a praskaniu. [2; 13; 27; 31]

Okrem týchto dvoch hlavných typov existuje aj režim prechodový, viz obr. 14, v strede. Režim je kombináciou kondukčného režimu a kľúčovej dierky. Pri procese je laserový lúč dostatočne silný na vytvorenie kľúčovej dierky, ale nie tak aby ju udržal v oblasti celého zvaru. Výkon lasera a rýchlosť posuvu sú kontrolované, aby sa vytvorila čiastočná kľúčová dierka, ktorá prechádza do režimu vedenia. Využíva sa často pri zvarovaní hrubších materiálov, kde samotný režim kľúčovej dierky môže viesť k nadmernému prívodu tepla a deformácii a kondukčný režim nemusí poskytnúť dostatočnú penetráciu, [2; 31; 33]

2.4.1 Typy laserov

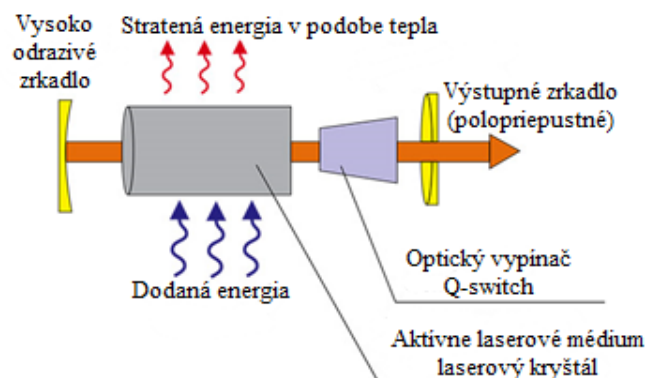
Existuje niekoľko typov laserov, ktoré možno využiť na rôzne aplikácie ako napríklad zváranie, rezanie a vrtanie. Niektoré z najbežnejších typov zahŕňajú plynové, pevno látkové (obr. 16), vláknové a polovodičové lasery. Plynové lasery používajú ako aktívne médium zmes plynov, zatiaľ čo pevno látkové používajú ako aktívne médium pevný kryštál. Vláknové využívajú káble z optických vlákien na zosilnenie lúča a polovodičové používa polovodič. Každý typ má svoje výhody a nevýhody, ako sú náklady, energetická účinnosť a vlnová dĺžka. Každý má svoje špecifické vlastnosti a aplikácie, medzi základné typy patria: [33; 34]

- CO_2 lasery – plynové lasery, využívajúce ako aktívne médium zmes oxidu uhličitého, dusíka a hélia sú najbežnejším typom laserov používaných v priemyselných aplikáciách laserového zvárania. Vyžarujú infračervené svetlo s vlnovou dĺžkou 10,6 mikrometrov a majú vysoký výkon a účinnosť kde sa až 30% príkonu premieňa na laserový výstup. CO_2 lasery pracujú v pulznom aj kontinuálnom režime v závislosti od aplikácie. Nevýhodou je, že vyžadujú vysoké napätie a prúd na prevádzku, čím sú menej účinné ako iné typy. Vyžadujú tiež prívod plynu a chladiaci systém, čo zvyšuje náklady a zložitosť. Často sa využívajú na zváranie hrubších materiálov, ako sú kovy s hrúbkou väčšou ako 5 milimetrov. Schému lasera je možné vidieť na obrázku 15. [34; 35; 36]



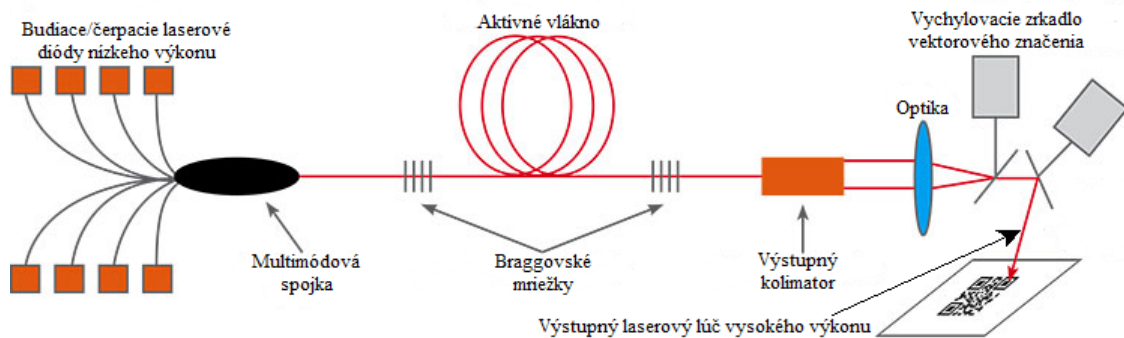
Obr. 15 Schéma CO_2 laserov [35].

- Nd:YAG lasery – sú pevno látkové lasery, ktoré používajú ako médium izotropný kryštál ytrito-hlinitého granátu dopovaného iontami neodýmu. Vyžarujú svetlo s vlnovou dĺžkou 1,06 mikrometra v oblasti blízkej infračervenej, ktoré je voľným okom neviditeľné. Majú vysokú kvalitu lúča a sú schopné produkovať vysoký výkon s dobrou kolimáciou lúča a stabilitou. Výhodou je ich schopnosť pracovať v pulznom aj kontinuálnom vlnovom režime. Využívajú sa na presné zváranie, gravírovanie, vrtanie a na zváranie tenkých materiálov a materiálov, ktoré sa ťažko zvárajú inými typmi laserov, ako je meď, zlato a striebro. [34; 37; 38]



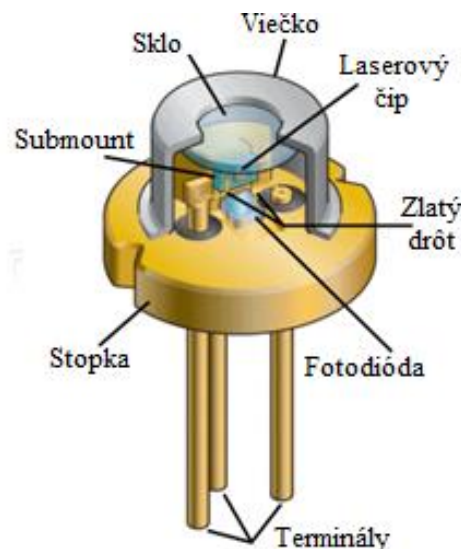
Obr. 16 Schéma pevno látkového lasera [37].

- Vláknové lasery – typ pevno látkového lasera, ktorý používa optické vlákno ako médium na zosilnenie laserového lúča. Vlákno je zložené z prvkov vzácnych prvkov ako erbium, yterbium a neodým, ktoré produkujú laserové svetlo prostredníctvom procesu nazývaného stimulovaná emisia . Vyžarujú svetlo s vlnovou dĺžkou okolo 1 mikrometra. Sú vysoko účinné, kompaktné a spoľahlivé, vďaka čomu sú ideálne pre širokú škálu priemyselných aplikácií vrátane rezania, značenia, spracovania materiálov a na zváranie kovov ako je hliník a meď, kvôli vysokej miere absorpcie týchto materiálov. Schéma vláknového lasera je na obrázku 17. [33; 34; 38]



Obr. 17 Schéma vláknového lasera [53].

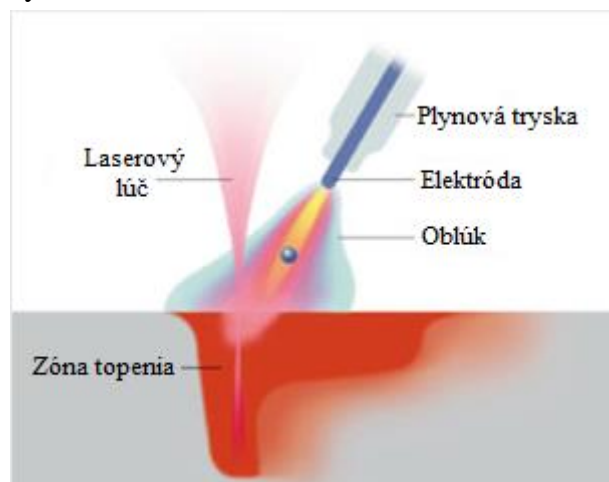
- Diskové lasery – sú typom pevno látkového lasera, ktorý ako primárnu zložku používa tenké, ploché diskovité médium vyrobené z laserovo aktívneho materiálu s obsahom yterbia alebo erbia. Disk je zvyčajne namontovaný na chladiči, aby odvádzal teplo generované počas celej prevádzky, Emitujú svetlo s vlnovou dĺžkou približne 1 a uplatňujú sa najmä pri zváraní tenkých a stredne hrubých materiálov a na aplikácie vysokorychlostného zvárania. [33; 34]
- Diódové lasery – sú typom polovodičového lasera, ktorý generuje svetlo prostredníctvom rekombinácie elektrónov a otvorov v p-n prechode s vlnovou dĺžkou okolo 0,9 mikrometra, majú nižší výkon v porovnaní s ostatnými typmi. Sú kompaktné, energeticky efektívnejšie, relatívne lacné a majú dlhšiu životnosť, vďaka čomu sú ideálne pre širokú škálu priemyselných aplikácií. Jednou z výhod je ich vysoká elektricko-optická účinnosť, čo znamená, že premieňajú veľkú časť dodanej energie na laserové svetlo. Diódové lasery sa používajú na zváranie tenkých materiálov, ako sú plechy. Konštrukciu laserovej diódy je možné vidieť na obrázku 18. [33; 34; 39; 40]



Obr. 18 Konštrukcia laserovej diódy [40].

2.5 Laser Hybrid

Zváranie metódou laserhybridu je relatívne nová technológia, ktorá kombinuje výhody laserového a oblúkového zvarovania. Laser poskytuje presný a koncentrovaný zdroj tepla, ktorý dokáže rýchlo a efektívne ohrievať obrobok, zatiaľ čo oblúk poskytuje stabilnejší proces, umožňuje hlbší prienik do materiálu a dobrú kontrolu zvarového kúpeľa. Predhrievanie laserom môže výrazne znížiť deformácie a zlepšiť kvalitu zvaru, čo sa ukázalo vhodné v mnohých aplikáciách. Metóda je obzvlášť vhodná pre veľkosériovú výrobu, vďaka vyššej rýchlosti odtavovania je veľmi rýchla a dosahuje až osemnásobok rýchlosti zvarovania metódou MIG. Proces je ideálnou voľbou pre veľké projekty a dobre funguje na celej škále materiálov, ako je oceľ, hliník alebo titán. Laserové predhrievanie zaisťuje konzistentné zahrievanie miesta pripojenia, čím sa minimalizujú defekty, ako je pórovitosť a praskanie. taktiež v hĺbke závaru, nižšiemu tepelnému príkonu, redukcii spotrebovaného prídavného materiálu či dobrej preklenuteľnosti medzery. [2; 4; 5; 41]



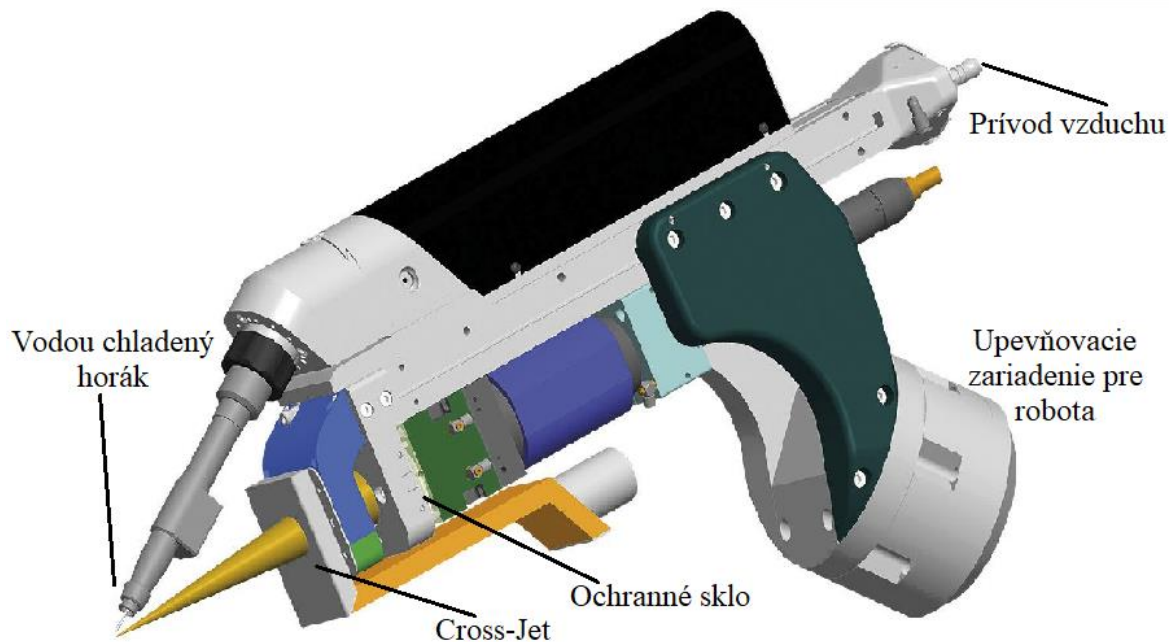
Obr. 19 Schéma laserhybridného zvarovania [4].

Technológia funguje na princípe postupného zahriatia povrchu materiálu pomocou laserového lúča na teplotu vyparovania kde v zvaranom kove začne vznikať parná dutina (obr. 19) v dôsledku unikajúcich kovových výparov čo uľahčuje vstup laserového lúča a zabraňuje výpadkom procesu. Veľkou výhodou pri tejto metóde je pôsobenie oboch zvaracích procesov súčasne v rovnakej procesnej zóne čo má práve za následok zvýšenie zvaracej hĺbky a mimoriadny pomer hĺbky ku šírke a taktiež rýchlosti. Aby oba procesy pôsobili súčasne metóda vyžaduje špecializované vybavenie, ktoré zvládne laserové aj oblúkové procesy, to zvyčajne zahŕňa použitie hybridnej zvaracej hlavy, ktorá kombinuje oba procesy do jedného horáka. [4; 5; 41]

2.5.1 Zvaracia hlava

Zvaracia hlava (obr. 20) sa skladá z kombinovaného zvaracieho horáka, laserového zdroja a zdroja oblúkového zvarovania má menšie rozmery a tak zaisťuje lepší prístup k zvaraným súčastiam. Je navrhnutá tak aby spájala laserový lúč s oblúkom, kde laserový zdroj sa používa na predhriatie súčastí. Ľahko sa pripojí k robotovi a taktiež je možné nastaviť procesné premenné ako napríklad ohniskovú vzdialenosť alebo smer zvaracieho drôtu voči laserovému lúču. Pri procesoch môže dochádzať k prípadným zvaracím čo môže viesť k poškodeniu laserovej optiky. Na ochranu slúži antireflexné kremmené sklo. [4; 41]

Proti poškodeniu, čistote a priepustnosti pre laser je v hlave od firmy Fronius za implementovaná jednotka CrossJet. CrossJet integruje vodou chladenú trysku, ktorá je navrhnutá tak aby optimalizovala výkon a efektivitu zvaracieho procesu. Vodou chladená konštrukcia dýzy pomáha odvádzať teplo a znižuje riziko deformácie. Čo je dôležité najmä pri zváraní tenkých materiálov a zložitých geometrií. Technológia znižuje rozstrek a dym, ktorý vzniká pri zváraní. To priaznivo ovplyvňuje bezpečnosť pracovníkov, ale aj efektivitu celého procesu, keďže znižuje potrebu čistenia hlavy. Vďaka CrossJet technológii je možné presnejšie kontrolovať parametre, čo zabezpečuje konzistentnú kvalitu zvarov a znižuje riziko pórovitosti alebo nedostatočného natavenia. Toto je obzvlášť dôležité pri zváraní vysokopevnostných materiálov, ktoré sú vystavené značnému namáhaniu alebo tlaku. [4; 41]



Obr. 20 Zváračská hlava 10kW [4].

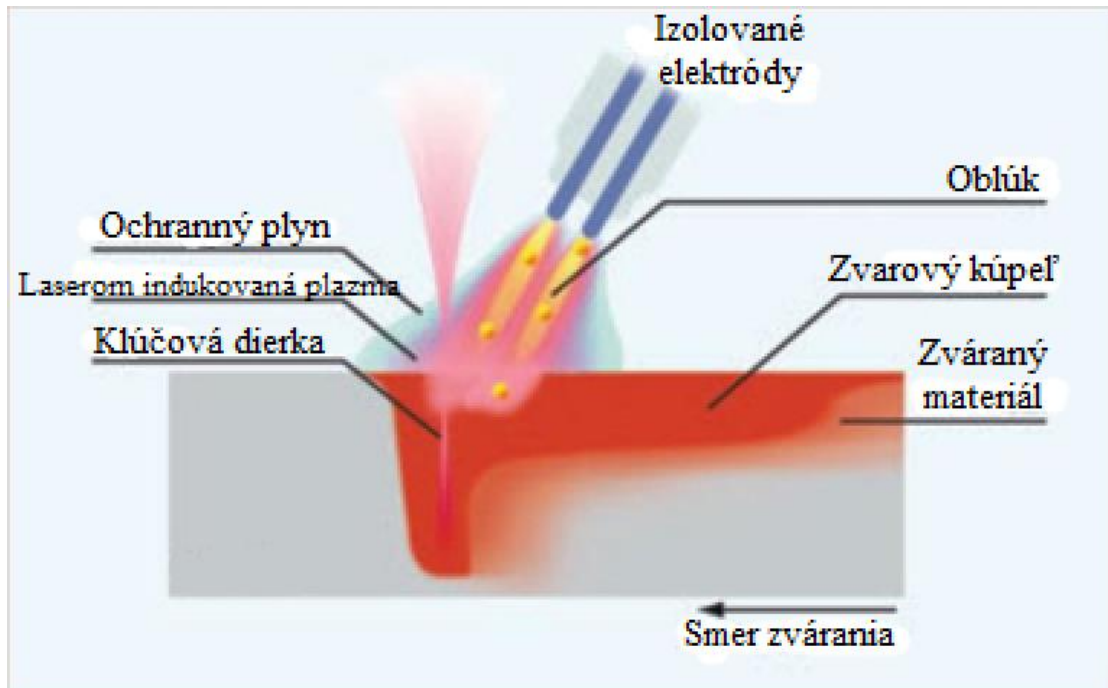
Zváračská hlava disponuje vysokovýkonným Nd:YAG alebo vláknovým zdrojom laseru, ktorý produkuje laserový lúč vysokej intenzity s malou veľkosťou bodu pôsobenia, čo umožňuje presné riadenie prívodu tepla a napomáha zníženiu potrebného prídavného materiálu. Zdroje MIG/MAG sa používajú na napájanie zvaracieho drôtu a elektródy, ktorá sa privádza cez horák a tavia sa oblúkom. Plynová tryska a horák sú vybavené chladiacim systémom s dvojitým okruhom. Z plne digitalizovaného a invertovaného zvaracieho zdroja sa získava prúd potrebný na zváranie a taktiež je odtiaľ riadený podávač drôtov. Zváračsku hlavu sa taktiež dá použiť pre laserové zváranie s a bez drôtu a laserové spájkovania horúcim drôtom. [4; 41]

2.5.2 Možnosti usporiadania Laserhybridu

Výber správneho usporiadania laseru a oblúku je rozhodujúce pre dosiahnutie najlepších výsledkov. V závislosti od aplikácie a požiadaviek na zváranie je ma výber množstvo usporiadaní, ktoré pomôžu zabezpečiť konzistentnú kvalitu výstupu. Medzi ne patria: [2]

- Usporiadanie vedľa seba – laser a oblúk sú umiestnené vedľa seba a sú namierené na rovnaký bod súčasti. Jednou z výhod konfigurácie je nezávislé ovládanie laseru a oblúku, čo ponúka presnú reguláciu tepla, ktorá pomáha znížiť deformáciu a rozstrek. Pri tomto nastavení je tiež možné nastaviť parametre v reálnom čase. Ak oblúk spôsobuje veľký rozstrek dá sa zvýšiť výkon laseru, aby sa oblúk stabilizoval a rozstrek zmenšil. Rovnako ak laser generuje príliš veľa tepla a spôsobuje deformácie, môže sa oblúk nastaviť tak aby kompenzoval nadmerný príkon tepla. [2; 42]

- Tandemové usporiadanie – používajú sa dva oblúky v kombinácii s jedným laserovým lúčom. Oblúky sú umiestené za sebou a smerujú na rovnaký bod. Laser je zhora zameraný na ten istý bod. Nastavenie je vhodné pre zváranie hrubších materiálov alebo ak sa vyžaduje hlboký a užší zvar. Tandemové usporiadanie ponúka vyššiu rýchlosť zvárania v porovnaní s inými nastaveniami. Vďaka použitiu dvoch oblúkov je možné zvärať rýchlejšie bez zníženia kvality zvarov, čo je veľká výhoda pri väčších projektoch, ktoré vyžadujú vyššie rýchlosti alebo pri použití vo veľkosériovej výrobe. Dva oblúky pracujúce synchronizovane vytvárajú väčší zdroj tepla, čo umožňuje lepšiu penetráciu, hlbší a rozsiahlejší zvar. Pri tandemovom nastavení je náročné upraviť parametre zvárania v reálnom čase. Schéma zapojenia je zobrazená na obrázku 21. [43; 45]



Obr. 21 Schéma tandemového nastavenia [45].

- Koaxiálne usporiadanie – laser a oblúk sú spojené do jedného lúča, ktorý je nasmerovaný na súčasť. Poskytuje sústredenejší zdroj tepla ako pri usporiadaní vedľa seba. Nastavenie môže byť obzvlášť vhodné pri práci s hrubšími materiálmi alebo pri potrebe hrubšieho zvaru. Poskytuje lepšiu penetráciu materiálu, vďaka čomu je vhodný pre zložitejšie úlohy. Nevýhodou je ťažšia kontrola prívodu tepla, keďže laser a oblúk sú spojené do jedného lúča preto je náročnejšie upraviť parametre zvárania v reálnom čase. [42; 44]
- Hybridné usporiadanie – laser a oblúk sa používajú súčasne na vytvorenie hlbokého, úzkeho zvaru s cieľom vytvoriť synergický efekt. Laser vytvára vysoko presný a sústredený zdroj tepla, ktorý preniká hlboko do materiálu. Oblúkové zváranie poskytuje prídavný materiál a stabilizuje proces, Laser je zvyčajne umiestnený nad súčasťou a pod ním prebieha proces oblúkového zvárania. Proces laserového zvárania a oblúkového zvárania sú synchronizované tak, aby spolupracovali, pričom proces oblúkového zvárania zvyčajne poskytuje prídavný materiál do zvaru. Vďaka hybridnému usporiadaniu je možné lepšie kontrolovať parametre a vzniká tak lepšia kontrola nad procesom zvárania. [42; 45; 46]

2.6 Hyperbarické zváranie

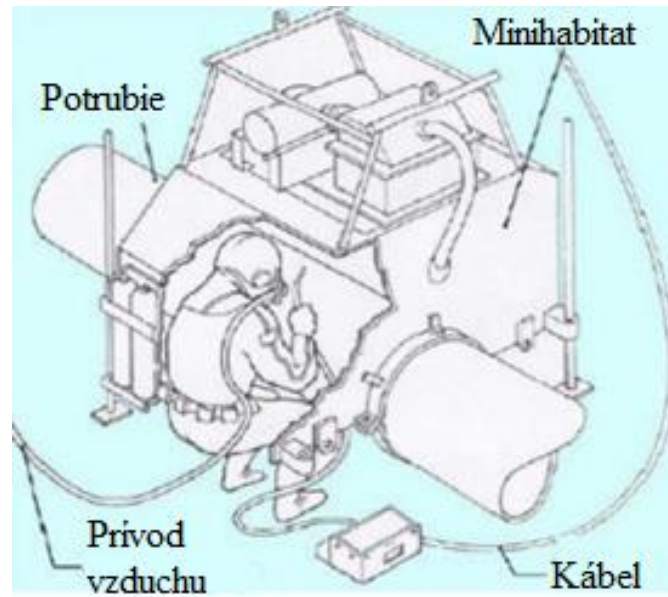
Jednou z budúcich možností využitia zvárania pomocou technológie laserhybridu by mohlo byť hyperbarické zváranie. Využitie by bolo možné nájsť napríklad pri oprave podvodných ropovodov alebo plynovodov, kde sú potrebné vysoko kvalitné zvarov. Hyperbarické zváranie je typ zvárania, ktorý si vyžaduje špeciálne techniky a nástroje, používa sa zvyčajne pod vodou v hĺbkach väčších ako 50 metrov. Ide o špeciálnu metódu, ktorá sa vyžaduje roky zručnosti a školenia. Využitie tejto metódy sa ukázalo prospešné pre rôzne priemyselné odvetvia, ako je stavba lodí, podvodná stavba alebo ropný priemysel. Hyperbarické zváranie sa rozdeľuje na dva hlavné typy a to mokré a suché zváranie. Mokré zváranie je vykonávané priamo vo vode (obr. 22), pričom zvárač používa elektródu, ktorá je špeciálne vyrobená na použitie vo vode. Elektródy sú vyrobené z dvoch komponentov a to pravého kovu a povlaku tavidla. Zliatiny sa môžu líšiť od mäkkej ocele, nerezovej oceli, vysokopevnostnej ocele, bronzu alebo hliníka. Povlak tavidla sa pridáva na ochranu zvarového kúpeľa pred znečistením a oxidáciou. [2; 47]



Obr. 22 Mokré zváranie so špeciálnou elektródou [47].

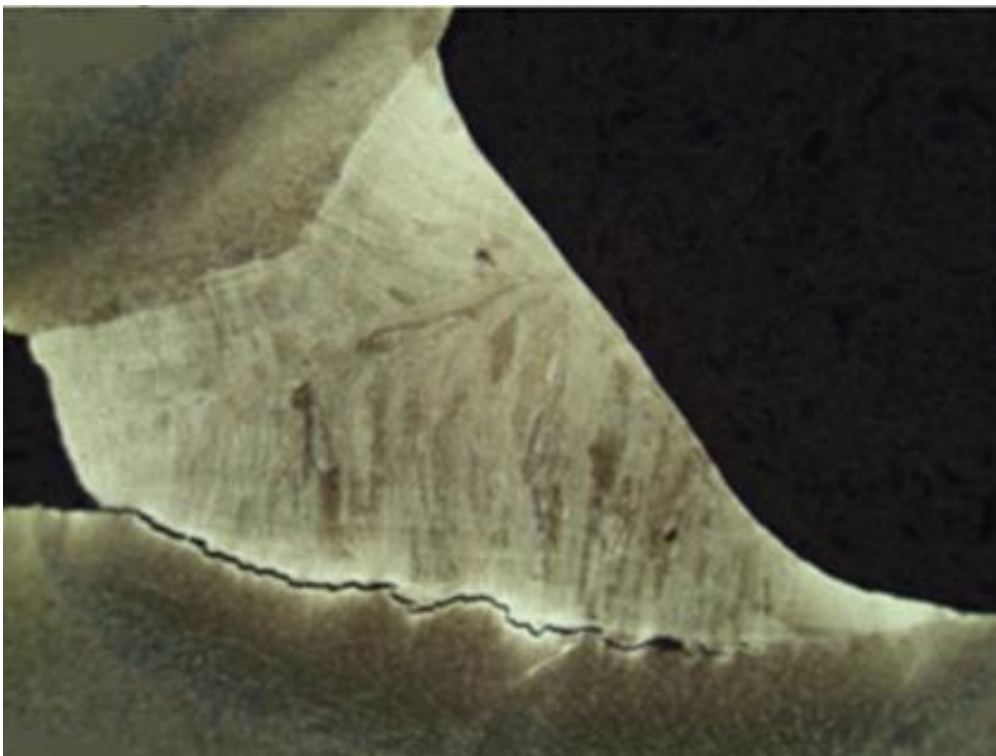
Naopak suché zváranie využíva pretlakovú komoru, ktorá je vyrobená z relatívne ľahkých materiálov, keďže odoláva vcelku nízkym teplotám. Komora (obr. 23) slúži na vytvorenie suchého prostredia a poskytuje dýchatelný vzduch, najčastejšie zmesou hélia a kyslíku, aby sa zabránilo vniknutiu vody do komory, tlak v nej je stlačený na rovnaké hodnoty ako má voda okolo nej, pričom z hydrostatiky vyplýva, že maximálny tlak je v hornej časti komory, zatiaľ čo plyn a voda budú v spodnej časti komory s rovnakým tlakom. Hydrostatický tlak vo vnútri komory je rovnaký ako v okolitej vode. Zvary zhotovené v hyperbarickej komore sú vo všeobecnosti kvalitnejšie ako v mokrých podmienkach. Zvárač pritom vykonáva zváranie v suchom prostredí vo vnútri komory kde zvárací oblúk nie je v kontakte s okolitou vodou a môže využívať konvečné metódy. Počas procesu má na sebe nasadenú potápačskú prilbu cez ktorú má prívod vzduchu. [2; 47; 48]

Jednou z výhod je tiež možnosť zvärať obrovské štruktúry, ktoré je ťažké po zvarení na povrchu presunúť do vody, ako napríklad ropné plošiny, trupy lodí alebo potrubia. Suché prostredie počas zvárania minimalizuje vznik pórov a defektov vo zvare, čím vzniká pevnejší a odolnejší zvar. Proces je taktiež vhodný pre opravu konštrukcií a stavieb poškodených koróziou alebo iným opotrebením. Aj napriek mnohým výhodám hyperbarického zvárania existujú určité rizika ako napríklad dekompresná choroba, ktorá sa vyskytuje keď sa zvárač vynorí príliš rýchlo. Aby sa tieto rizika minimalizovali zvárači absolvujú rozsiahle školenia a musia dodržiavať bezpečnostné protokoly, ktoré im však nedovoľujú zváranie vo väčších hĺbkach. Práve bezpečnosť a taktiež nákladová efektívnosť pri zváraní na mori podnietili výskum smerujúci k vytvoreniu automatického hyperbarického zvárania bez potápača alebo diaľkovo ovládaného zvárania. [2; 49; 50; 51]



Obr. 23 Schéma pretlakovej komory [48].

Automatické hyperbarické zváranie je efektívne kvôli širokému spektru dôležitých faktorov. Je to bezpečný, účinný a vysoko produktívny spôsob, ako dosiahnuť precízne výsledky zvarov. Aby sa dosiahli požadované výsledky celý proces a rôzne procesné parametre musia byť kontrolované a primerane nastavené, aby sa dosiahli požadované výsledky. Zváranie pri požadovanom tlaku sa vykonáva v hyperbarickej komore, ktorá je nasýtená zmesou plynou, vďaka čomu nie je potrebné aby sa zváranie vykonávalo manuálne, čo zabezpečuje vyššiu bezpečnosť. [2; 50]



Obr. 25 Vodíkom asistovaná trhlina v kútovom zvare [51].

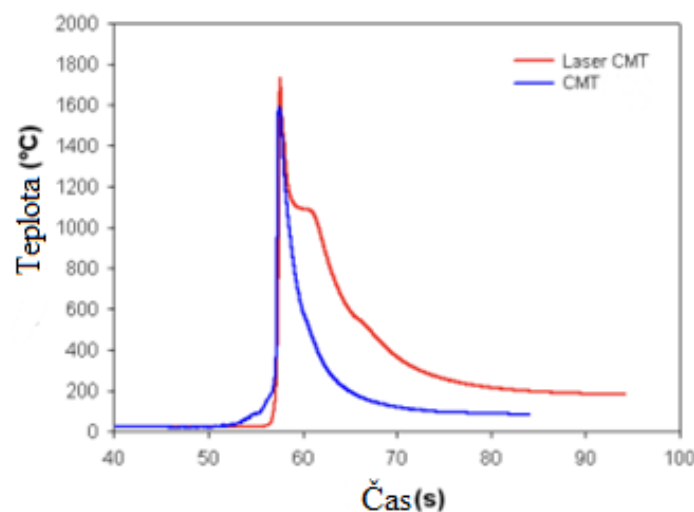
Pre získanie pevného a kvalitného zvaru je potrebné sledovať celý proces zvarovania, čo zahŕňa sledovanie teploty, tlaku ako aj zloženie plynu vo vnútri komory. Zloženie plynov sa mení v závislosti od aplikácie a hĺbky zvarovania. Typicky sa využíva zmes hélia a kyslíka, pričom pomer sa môže líšiť od hĺbky a tlaku komory. V menších hĺbkach je použité vyššie percento kyslíka aby sa zabezpečila lepšia efektívnosť a bezpečnosť. Okrem hélia a kyslíka sa do zmesi pridáva argón pre zlepšenie kvality zvaru. Proces zvarovania môže dosahovať rýchlosti až 20 metrov za hodinu vďaka čomu je automatické hyperbarické zvarovanie vysoko efektívna a bezpečnejšia metóda najmä pre veľké projekty.[48; 49; 55]

Zabezpečenie kvality zvarov vo väčších hĺbkach je ale často problémom. Mikroštruktúra a mechanické vlastnosti zvarov môžu byť ovplyvnené prídavným materiálom a základným materiálom. So zvyšujúcim sa tlakom dochádza taktiež k nárastu hustoty plynu a tepelnej difúzie. Okrem toho okolitá voda s teplotou približne okolo 4 °C pôsobí ako chladič. Pri opravách podvodných plynovodov ktorými sa prepravuje plyn sa ochladzovanie ešte zvyšuje a vzniká väčší odber tepla a existuje potenciálna prítomnosť vodnej pary. Kombinácia týchto faktorov má za následok rýchle chladnutie zvarového kovu čo môže spôsobiť tvorbu makroštruktúr náchylných na vodíkom asistované praskanie (Obr. 25). [51; 56]

Preto je dôležité počas celého procesu udržiavať dostatočné množstvo tepla v zóne zvaru. Výroba vysokokvalitných zvarov teda závisí od výberu správneho prídavného materiálu a podmienok zvarovania. Zvary by mali mať porovnateľnú alebo nadmernú tvrdosť v porovnaní so základným materiálom a vykazovať prijateľnú lomovú húževnatosť, odolnosť proti praskaniu a odolnosť voči korózii. Na vyriešenie týchto problémov by mohla slúžiť technológia laserhybridu, kde by laser napomáhal procesu oblúkového zvarovania, tým že by poskytol dodatočný ohrev zvaracej zóny s cieľom znížiť rýchlosť chladnutia. [51]

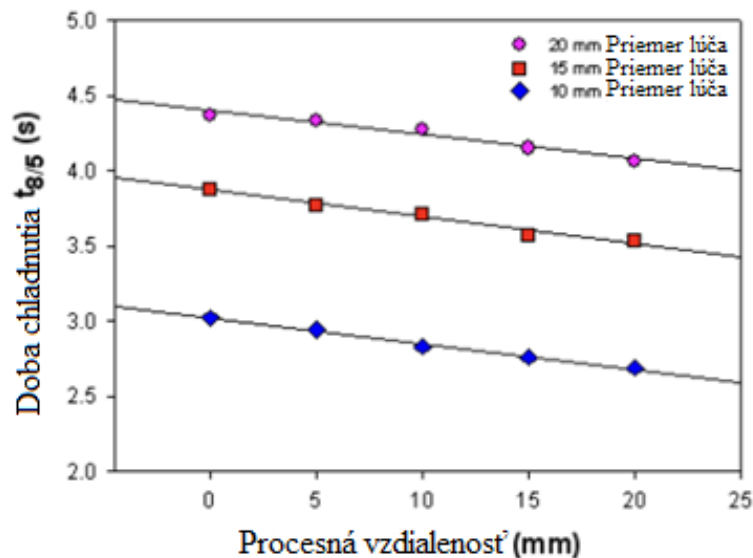
2.7 Hyperbarické zvarovanie LaserHybridom

Pri testovaní využitia technológie laserhybridu pre účely hyperbarického zvarovania vedcov z univerzity Cranfield prišli na to, že pri použití laseru s technológiou zvarovania CMT, sa predĺži existencia zvarového kúpeľa, čím sa predĺži a zároveň aj spomalí čas chladnutia. To bude prospešné najmä z hľadiska zníženia rýchlosti tvorby tvrdých metalurgických fáz, ktorá by mohli podporiť vodíkom asistované praskanie. Na obrázku 26. je možné vidieť porovnanie termálneho cyklu zvarovania technológie CMT samostatne a s použitím laseru. [51]



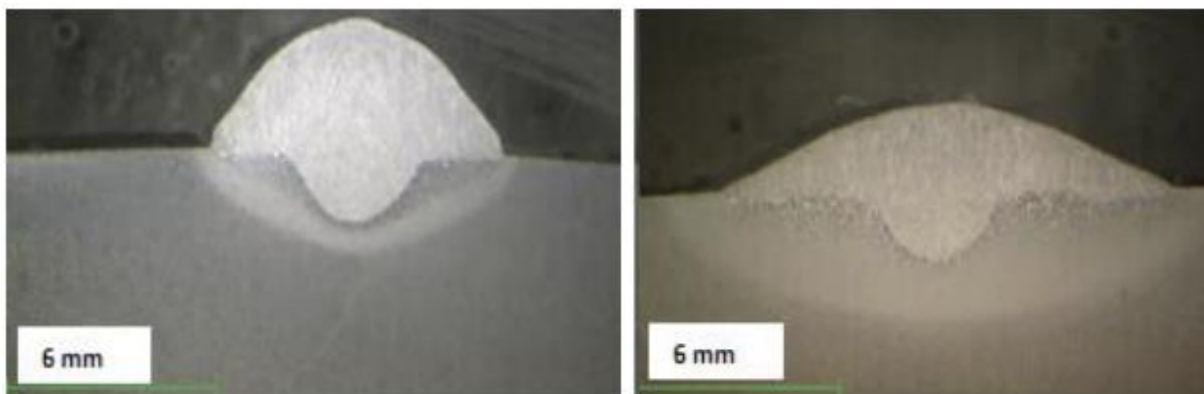
Obr. 26 Termálny cyklus CMT a laser CMT [51].

Pri testoch sa ukázalo, že hlavnými ovplyvňujúcimi parametrami sú výkon lasera a priemer lúča, ktoré ovplyvňujú čas chladnutia. Väčší priemer lúča a vysoký výkon lasera predlžujú čas chladnutia zvaru kvôli dlhšej interakcii lúča s materiálom a vyššej bodovej energii. Na obrázku 27. je možné vidieť vplyv priemerov laserového lúča na dĺžku chladnutia odkiaľ možno pozorovať dlhší čas chladnutia pri väčšom priemere. Dôležitým aspektom je, že laser zohrieva zvar na teplotu vyššiu ako je teplota austenitickej transformácie, preto aj keď sa zvarový kúpeľ ochladí na teplotu pod 400 °C, čo je teplota martenzitickej premeny pri materiáloch potrubí, sa po dopade lasera opäť zahreje a transformuje na austenit s predĺženým a pomalším časom na chladnutie. [51]



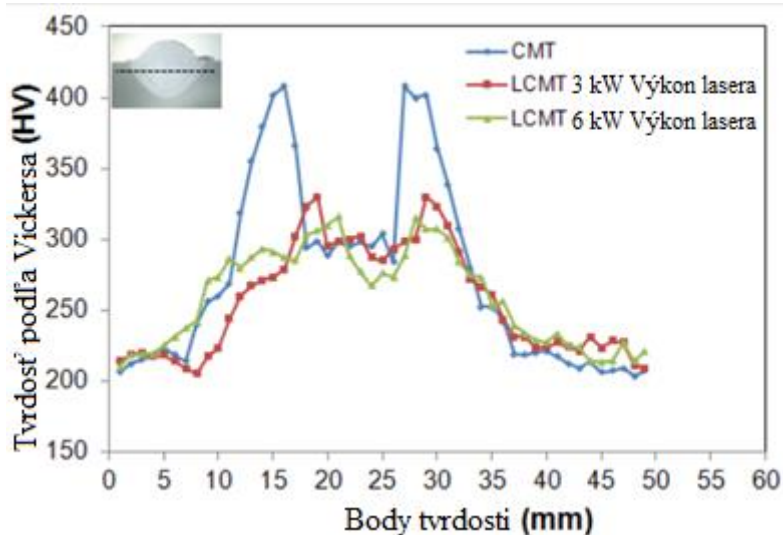
27. Vplyv priemeru lúča čas chladnutia [51].

Na obrázku 28. môžeme pozorovať, že použitie lasera nemá vplyv na hĺbku zvaru ale napriek tomu je vidieť vytvorenie hladkého prechodu medzi zvarom a materiálom potrubia čo má za následok zmenšenie oblasti koncentrácie napätia tým sa tiež zlepšuje štruktúrna integrita. Zároveň sa dá pozorovať väčšia tepelne ovplyvnená oblasť pri použití lasera čo by mohlo byť spôsobené väčšou oblasťou ohrievaného materiálu v dôsledku použitia väčšieho laserového lúča ako je oblasť ohrevu oblúkom CMT. [51]



Obr. 28 Porovnanie zvarov CMT technológie a CMT + laser [51].

V dôsledku zväčšenej tepelne ovplyvnenej oblasti výsledky tvrdosti ukázali výrazné zníženie nemerných hodnôt oproti samotnému použitiu CMT technológie. Výsledky na obrázku 29. ukazujú, že maximálna tvrdosť sa vyskytuje v tepelne ovplyvnenej oblasti zatiaľ čo minimálna tvrdosť v základnom materiáli. Najvyššia hodnota bola nameraná v tepelne ovplyvnenej oblasti hrubého zrna a postupne sa znižuje smerom k základnému materiálu. Pridaním lasera k technológii CMT môžeme znížiť tvrdosť až o 25 % v závislosti od výkonu lasera. Zníženie tvrdosti sa môže pripísať vyššiemu zadržiavaniu tepla, ktoré by mohlo viesť k popúšťaniu prítomného martenzitu, alebo môže ísť o austenitizáciu a tvorbu iných mäkkších fáz, napríklad feritu. [51]

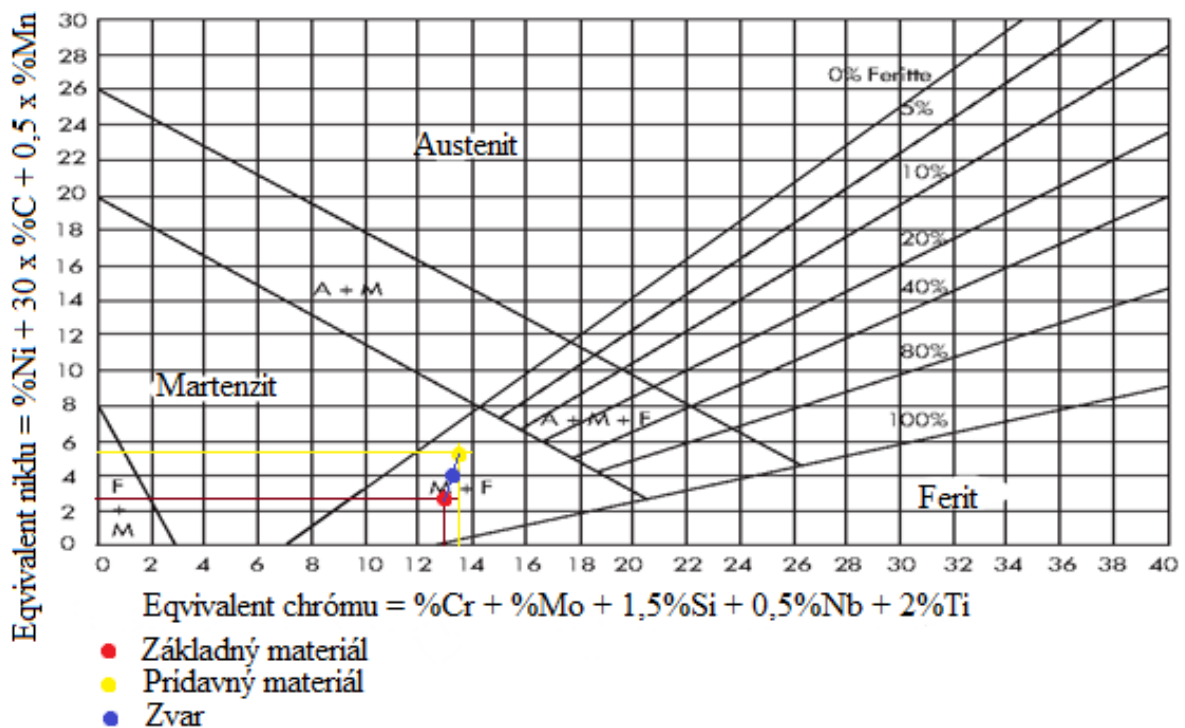


Obr. 29 Porovnanie rozloženia tvrdosti zvaru [51].

Pre využitie laserhybridovej metódy v hyperbarickom prostredí by bolo nutné vykonať ďalšie skúmania, ako napríklad chovanie zvarového kúpeľa pri rôznych hydrostatických tlakoch, preskúmanie mikroštruktúry zvarov, možné ochranné plyny a ďalšie skúmanie vplyvu parametrov na zvary.

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť práce sa zameria na opis procesu zvarovania, vrátane použitých zariadení, parametrov zvarovania a postupov zvarovania. Zvary budú pripravené a skúmané pomocou metalografických techník, preskúma sa mikroštruktúra, makroštruktúra a ich tvrdosť. Zvolený materiál X12Cr13 je žiarupevná martenzitická oceľ odolná voči korózii vo vodnom a parnom prostredí s odolnosťou voči agresívnemu, kyslému prostrediu a dobrou oxidačnou odolnosťou s možnosťou tvorenia trhlín za studena v tepelne ovplyvnenej oblasti. Vyznačuje sa vysokou žiaruvzdornosťou pre použitie až do 650 °C, dobrou tvárnosťou za tepla a zvárateľnosťou s obsahom chrómu cez 11 % pre zaistenie dobrej žiaruvzdornosti. Podiel vanádu, nióbu a dusíku v oceli zaisťuje vyššiu medzu klzu zatiaľ čo obsah volfrámu, kobaltu a bóru zvyšuje pevnosť. Pre vytvorenie martenzitickej štruktúry v oceli je potrebné zaistenie stredného ekvivalentu kobaltu v rozsahu >1,0%, vyplýva zo Schaefflerova diagramu (obr. 30). [65; 66]



Obr. 30 Schaefflerov diagram [54].

Pre zistenie približnej štruktúry zvaru bol vypočítaný ekvivalent chrómu a niklu pre základný materiál a prídavný materiál určená pozícia v Schaefflerovom diagram (obr. 30). Pri spojení základného materiálu a prídavného materiálu približne v strede je možné vidieť kde sa nachádza štruktúra zvaru.

Ekvivalent chrómu a niklu pre základný materiál sa vypočíta podľa vzorcov [54]:

$$\begin{aligned} CrEq_{ZM} &= \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + 2\%Ti \quad [-] \\ &= 12,5 + 0,06 + 1,5 \cdot 0,39 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 13,145 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} NiEq_{ZM} &= \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad [-] \\ &= 0,4 + 30 \cdot 0,09 + 0,5 \cdot 0,64 = 3,42 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Rovnako sa zistia hodnoty aj pre prídavný materiál. Ako prídavný materiál bol použitý drôt BÖHLER CN 13/4-MC martenzitickej legovanej liatej ocele s priemerom 1,2 milimetra, chemické zloženie sa nachádza v tabuľke 3 a mechanické vlastnosti v tabuľke 4. Zváranie bolo prevedené v ochrannej atmosfére argónu o čistote 100 %. [59]

Tab . 3 Chemické zloženie BÖHLER CN 13/4-MC [59].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
≤ 0,025	0,7	0,9	12	4,6	0,6

Tab . 4 Mechanické vlastnosti BÖHLER CN 13/4-MC [59].

Medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [Mpa]	Predĺženie A [%]
760	900	16

Ekvivalent chrómu a nikli pre prídavný materiál sa vypočíta [54]:

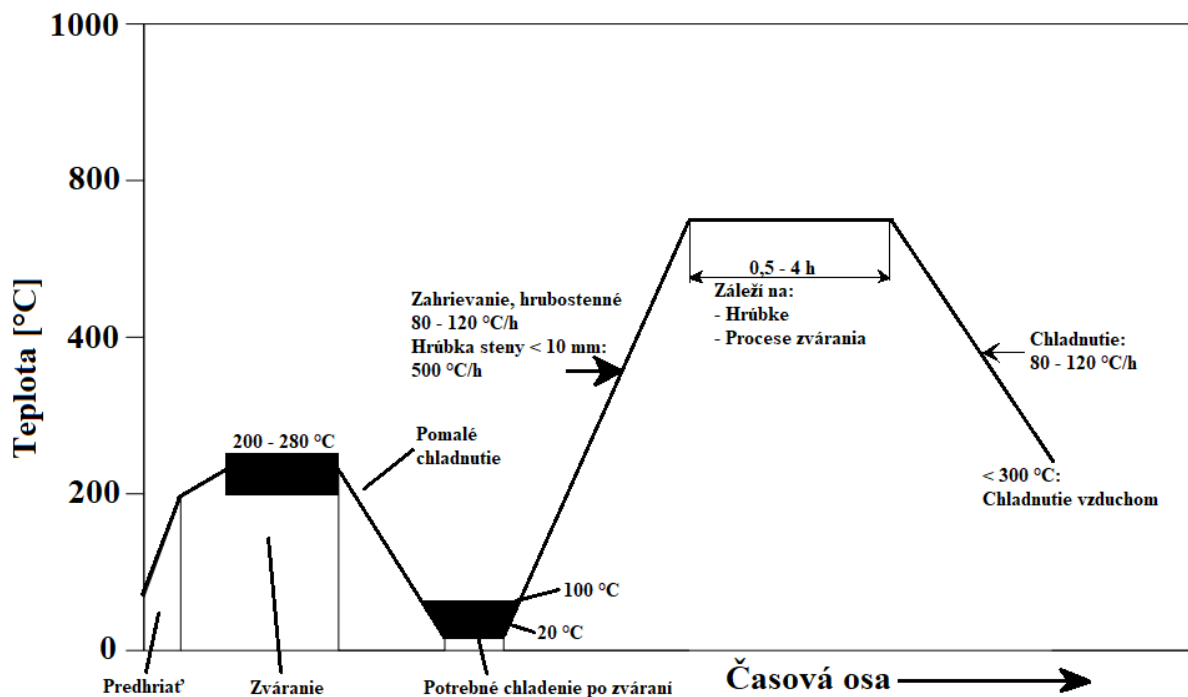
$$CrEq_{PM} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + 2\%Ti \quad (3.3)$$

$$= 12 + 0,6 + 1,5 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 13,65$$

$$NiEq_{PM} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (3.4)$$

$$= 4,6 + 30 \cdot 0,02 + 0,5 \cdot 0,9 = 5,65$$

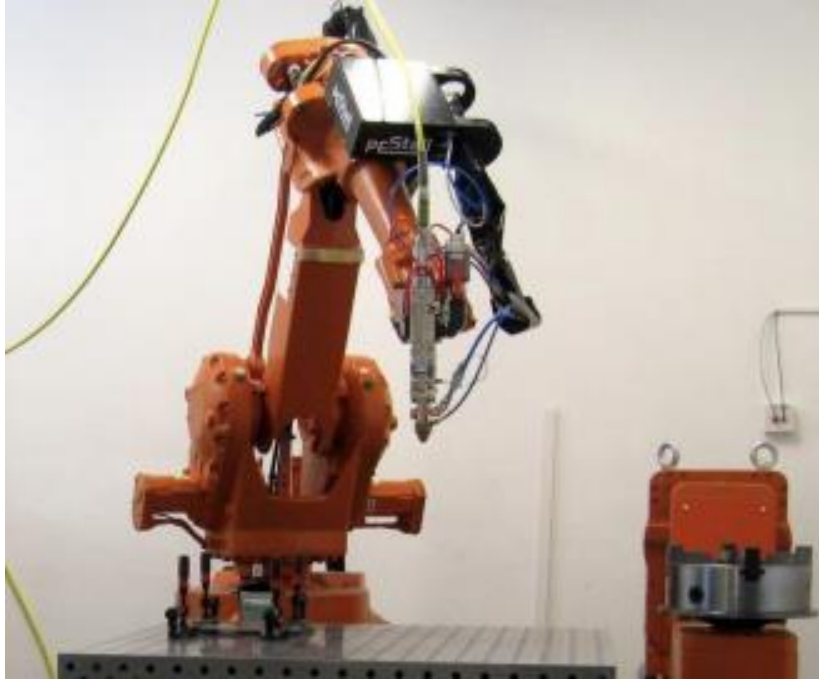
PWHT je odporúčané robiť pri teplote nad 760 °C pre zaistenie dostatočnej húževnatosti. Oceľ sa zvara až po úplnom tepelnom spracovaní a predhrieva sa na teplotu 150 až 300 °C v závislosti od hrúbky materiálu, použitej metóde a prídavného materiálu. Po ukončení procesu sa zvar dohrieva na teplotu predohrevu po dobu asi polhodiny s ochladením na teplotu interpass, vďaka čomu dochádza v rámci prvého štádia rozpadu martenzitickej štruktúry k popúšťaniu súčasne so znížením napätosti a k transformácií zostatkového austenitu. Zvara sa nízkym tepelným príkonom a využívajú sa prídavné materiály podobné alebo blízkeho zloženia ako základný materiál. Vedenie teplotného režimu je zobrazené na obrázku 31. [65; 66]



Obr. 31 Vedenie teplotného režimu pri zváraní 12 %-ných ocelí [65].

3.1 Zvárací proces a použité zariadenia

Pre experimentálnu časť boli vytvorené dva zvary pri rozdielnych parametroch a rýchlostiach zvárania. Pre zváranie bolo použité robotické zariadenie laserhybridu (obr. 32) v priestoroch Ústavu prístrojovej techniky AV ČR pomocou laseru IPG YLS 2000 a zvaračky od firmy Fronius TPS 320i PULSE.



Obr. 32 Zvárací robot v priestoroch ÚPT.

Vláknový laser YLS 2000 (obr. 33) od firmy IPG poskytuje vysoký výkon až 20 kW, s trvaním impulzu od 0,2 až po 10 ms a s maximálnou energiou impulzu 200 J pri frekvencii opakovania do 2 kHz. Zariadenie sa dá prevádzkovať buď v režime nepretržitej vlny alebo v režime dlhých impulzov pri opakovaní frekvencie až 5 kHz. [57]



Obr. 33 Laser IPG YLS 2000 [58].

Zváračka TPS 320i PULSE (obr. 34) od firmy Fronius je zvárací systém MIG/MAG, který dokáže podľa nastavení pracovať v režime štandard, pulznom, LCS (Low Spatter Control) a PMC. Zváracie zariadenie ma možnosť nastavenia prúdu od 3 do 320 A. [4]



Obr. 34 Zvárací zdroj TPS320i PULSE [4].

Na vybranom materiály boli vytvorené dva zvary pri rôznych parametroch a rýchlostiach zvárania, Pred zváraním bolo nutné vzorky pripraviť a očistiť. Očistená vzorka sa potom zaistila v prípravku pomocou úpiniek na zvárací stôl čo zabráni pohybu a zmene polohy pri procese. V tabuľke 5 a 6 sú uvedené použité parametre pre vzorku 1 a vzorku 2.

Tab . 5 Zváracie parametre.

	Výkon P [W]	Rýchlosť zvaru v_s [mm/s]	Napätie [V]
Vzorka 1	1400	12	18
Vzorka 2	1200	9	19

Tab. 6 Zváracie parametre.

	Prúd I [A]	Priemer zväzku [mm]	Účinnosť η Laser [-]	Účinnosť η MIG [-]
Vzorka 1	150	0,8	0,3	0,8
Vzorka 2	180	0,8	0,3	0,8

Pre vytvorené zvary bolo vypočítané vnesené teplo z parametrov zvárania. Vzorový výpočet vneseného tepla Q_{MAG1} pre MAG vzorku 1 [67]:

$$Q_{MAG1} = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_s \cdot 1000} = \frac{0,8 \cdot 18 \cdot 150}{12 \cdot 1000} = 0,18 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.5)$$

Vzorový výpočet vneseného tepla Q_{Laser1} pre laser vzorky 1 [67]:

$$Q_{laser1} = \frac{\eta \cdot P}{v_s \cdot 1000} = \frac{0,3 \cdot 1400}{12 \cdot 1000} = 0,035 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.6)$$

Vzorový výpočet celkového vneseného tepla Q pre vzorku 1 [67]:

$$Q_1 = Q_{MAG1} + Q_{Laser1} = 0,18 + 0,035 = 0,215 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.7)$$

Hodnoty vypočítaného vneseného tepla sú uvedené v tabuľke 5.

Tab 7. Vypočítané vnesené teplo.

	MAG $Q_{MAG} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$	Laser $Q_{Laser} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$	Celkové Q $[\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$
Vzorka 1	0,18	0,035	0,215
Vzorka 2	0,304	0,04	0,344

3.2 Metalografické skúšky

Po zváracích procesoch boli vzorky narezané, obrúsené, naleptané a pripravené aby mohli byť ďalej skúmané metalografickými skúškami. Metalografické vzorky boli pripravené na rezacom stroji Labotom-5 (obr. 35) od firmy Struers LLC. Labotom-5 je stolný rezací stroj, ktorý je špeciálne navrhnutý pre použitie v laboratóriách aj vo výrobe. Stroj obsahuje chladiacu a recirkulačnú jednotku, vďaka ktorým je možné rezať všetky druhy kovov, je chránený krytom s automatickou zámkou, ktorý sa zamyká pri spustení a odomyká pri vypnutí. Vzorka sa do stroja upína pomocou T drážok a následne sa nastaví parametre rezania na ovládacom paneli a zvolí sa vhodný rezný kotúč o veľkosti 250 mm. Projektovaná kapacita je až 90 mm v priemere a dĺžku je možné rozšíriť predlžovacou skrinkou. [60]



Obr. 35 Labotom-5 Struers LLC [61].

Pred naleptaním bolo nutné vzorky obrúsiť, k čomu sa použila vodou chladená brúska Saphir 330 od firmy ATM (obr. 36). Brúska Saphir 330 je jednokotúčová brúska a leštička pre brusné kotúče v rozmerom 200 – 250 milimetrov. Variabilná rýchlosť je nastaviteľná pomocou otočného spínaču a je možné ju meniť aj počas pracovného cyklu dokáže dosiahnuť rýchlosti od 50 do 600 otočiek za minútu. Prívod vody sa ovláda manuálne pomocou oplachovacieho kohútika. Pre výbrusy boli použité štyri drsnosti kotúčov a to 250, 400, 600 a 800. [62]



Obr. 36 ATM Saphir 330 [62].

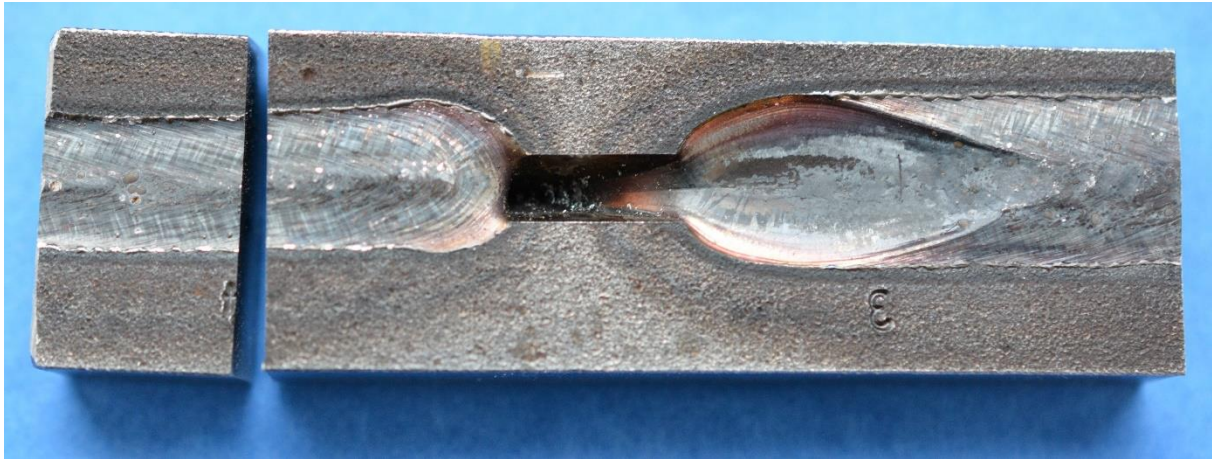
Vybrúsené vzorky boli naleptané pomocou roztoku 3 % Nitalu, ktorý bol naliatí do Petriho misky a následne opláchnutý a osušený. Následne sa ukázala okom viditeľná štruktúra, ktorá mohla byť ďalej skúmaná. Štruktúra bola následne skúmaná pomocou stereomikroskopu SSM-3EC2 (obr. 37). SSM-3EC2 je zväčšovací mikroskop vybavený kamerovým spojením a špeciálna hlava je vybavená plynulým zoom v kombinácii s IOx okulármi, vďaka čomu sa dá plynule dosiahnuť zväčšenie až do 40x. Pracovná vzdialenosť je 85 milimetrov a pozorovaný objekt ako aj tanier je možné osvetliť súčasne. Následne vytvorené snímky z mikroskopu boli ďalej spracované v program DinoCapture2.0. [63; 64]



Obr. 37 SSM-3EC2 [64].

3.3 Makroštruktúra zvarov

Na obrázku 38 je možné vidieť rozdielne nastavenie parametrov zvárania kde na vzorku 2 sa dá pozorovať vplyv nižšej rýchlosti zvárania a nižšieho výkonu na vzhľad zvaru, vzniká väčší rozstrek a menej esteticky prijateľný zvar.



Obr. 38 Vľavo vzorka 1 a vpravo vzorka 2.

Po vyhodnotení makroštruktúry zvarov je jasne viditeľný rozdiel veľkosti zvarov pri nastavení rozdielnych parametrov. U oboch prípadov bol dosiahnutý plný prievar, pri vzorku 1 (obr. 39) je zrejmá menšia šírka zvaru ako aj menšia tepelne ovplyvnená oblasť, preliačiny ale zároveň lepší prievar s jasne viditeľným koreňom ako pri vzorku 2 (obr. 40), kde vplyvom nižšej rýchlosti a výkonu vznikla viditeľná vada.

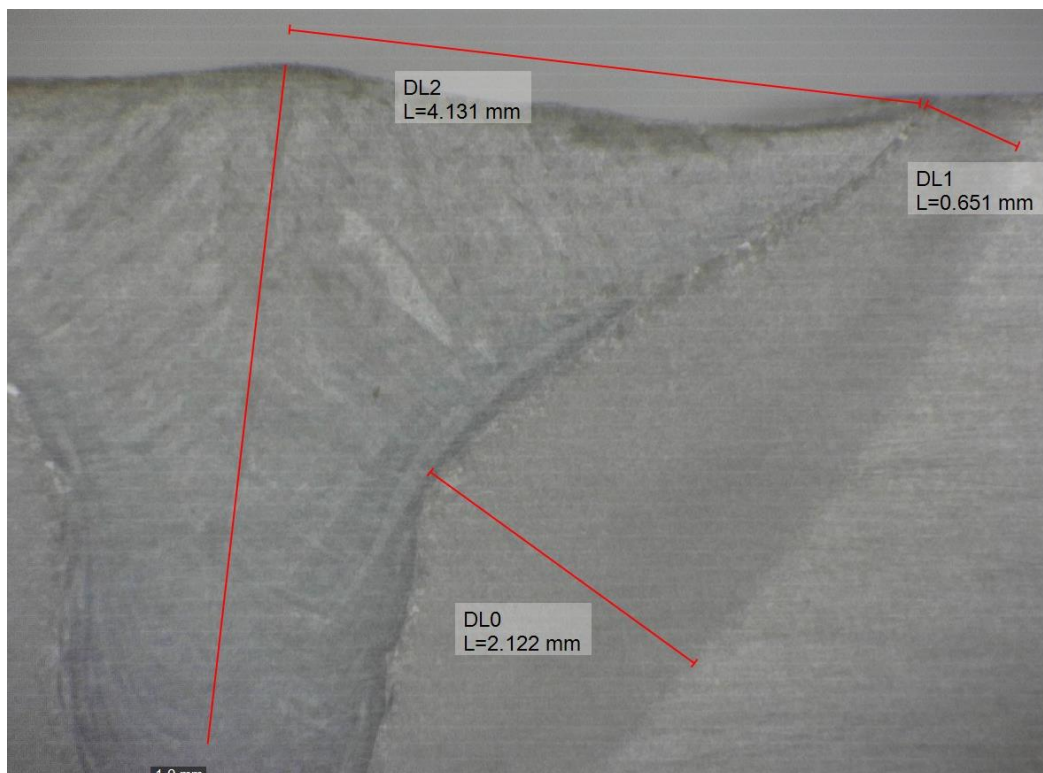


Obr. 39 Makroštruktúra vzorku 1.

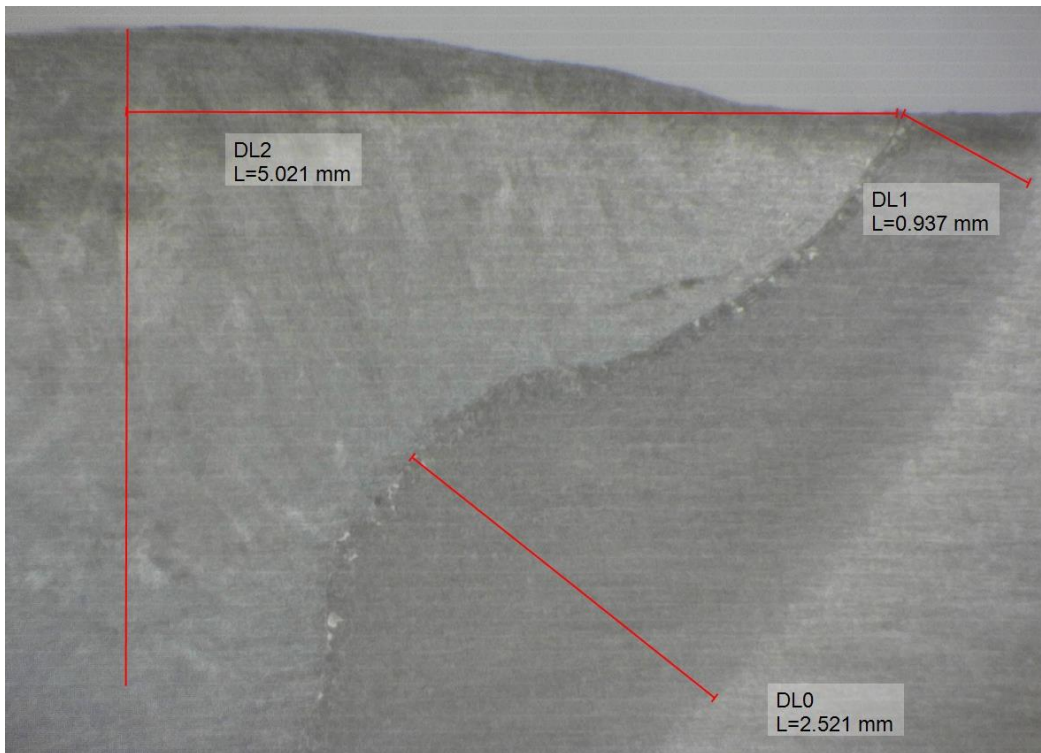


Obr. 40 Makroštruktúra vzorku 2.

Pri detailnejšom pohľade na vzorky pomocou fotiek zo stereomikroskopu je vidieť rozdiel v šírke zvaru, kde pri vzorku 2 (obr. 42) je skoro o 1 milimeter väčší ako aj tepelné ovplyvnená oblasť, ktorá je väčšia o skoro pol milimetra pri najväčšej šírke a o 0,3 milimetra pri lícu zvaru oproti vzorku (obr. 41). Rozdielna veľkosť tepelne ovplyvnenej oblasti je pravdepodobne spôsobená použitím vyššieho prúdu pri zváraní vzorky 2.

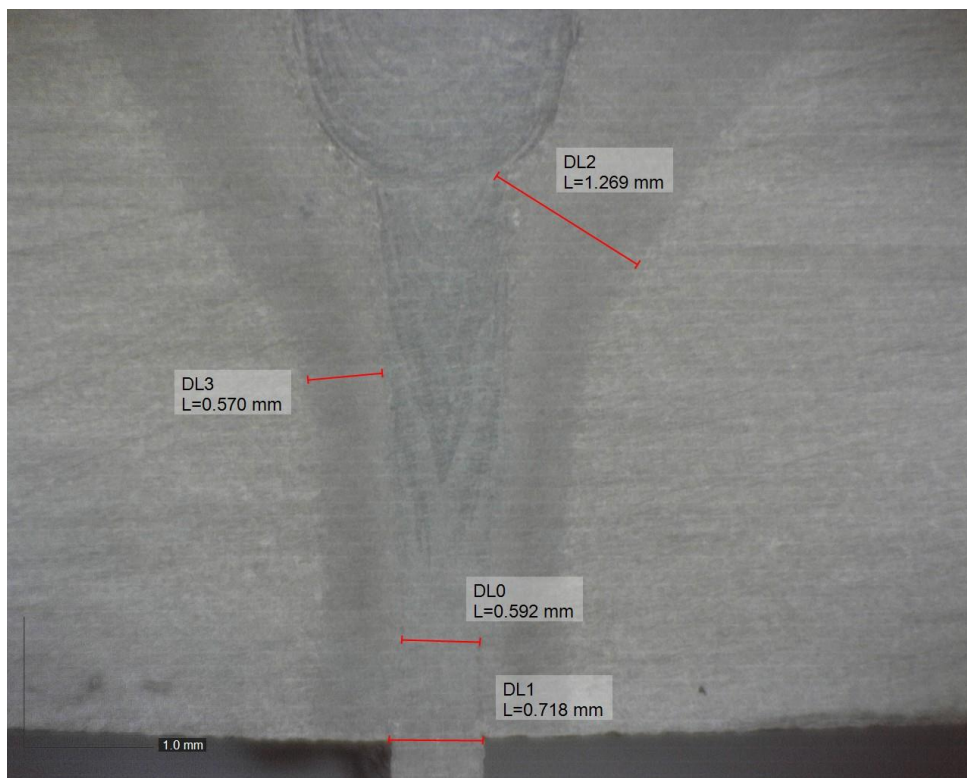


Obr. 41 Detailný pohľad na vzorku 1.

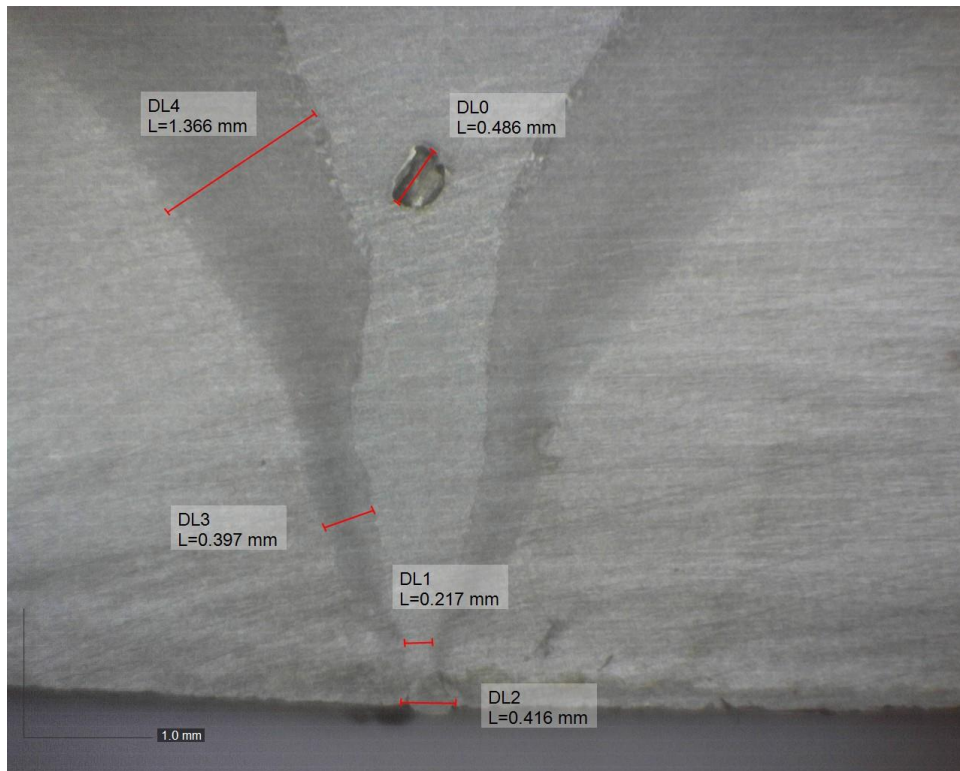


Obr. 42 Detailný pohľad na vzorku 2.

Na obrázkoch 43 a 44 kde sú vyfotené korene zvarov je viditeľný hlbší prievar so širším koreňom u vzorky 1 ako aj väčšia minimálna šírka zvaru. Na vzorke 1 je možné pozorovať jasný prechod medzi oblasťou, ktorá bola zvarená laserom a oblasťou, ktorá bola zvarená oblúkovým zvaráním, čo by mohlo naznačovať nevyplnenie celého zvaru prídavným materiálom. Na vzorku 2 bola zistená vada o veľkosti asi 0,5 milimetra.

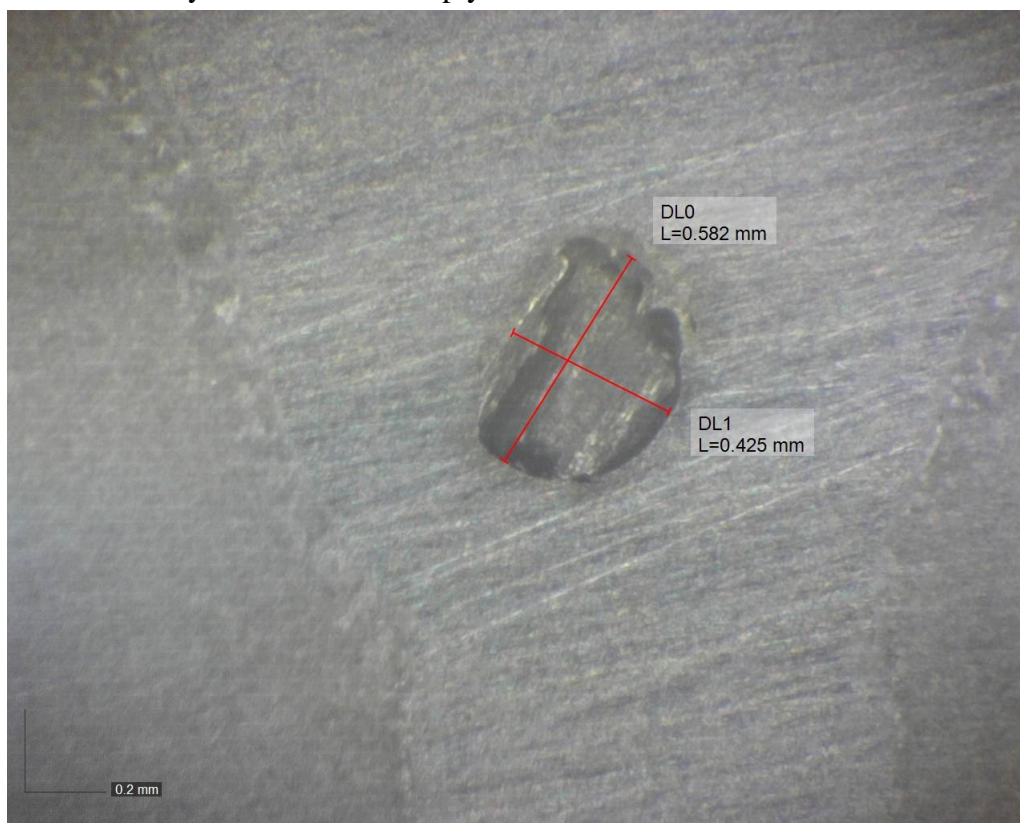


Obr. 43 Detailná pohľad na koreň vzorku 1.



Obr. 44 Detailný pohľad na koreň vzorku 2.

Väčším priblížením na vzniknutú vadu (obr. 45) je možné vidieť, že veľkosť je zhruba 0,5 milimetra na dĺžku a 0,4 milimetra na šírku. Vada je pravdepodobne zachytený pór, ktorý mohol vzniknúť zachytením ochranného plynu v koreni.



Obr. 45 Vada zvaru vzorku 2.

3.4 Mikroštruktúra zvarov

Detailný pohľad na mikroštruktúry základných materiálov a zvarov bol vytvorený v Ústave prístrojové techniky AV ČR. Mikroštruktúra základného materiálu oceli X12Cr13 (obr. 46) je tvorená prevažne temperovaným martenzitom.



Obr. 46 Mikroštruktúra oceli X12Cr13 [12].

Mikroštruktúra zvarového kovu bola zdokumentovaná iba pre vzorku 1. Na obrázku 47 sú viditeľné hlavné oblasti v ose zvaru. V porovnaní so základným materiálom sa mikroštruktúra výrazne nezmenila, zostala tvorená martenzitom s nízkym podielom feritu a početnými inklúziami o priemere menšom ako 1 μm .



Obr. 47 Mikroštruktúra zváranj oceli X12Cr13 zľava povrch, hlava, koreň [12].

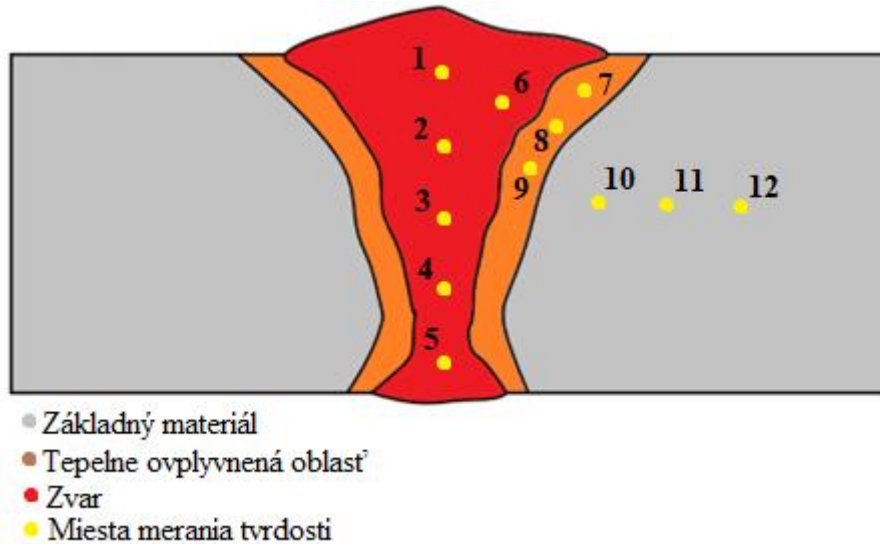
Na obrázku 48 je uvedená mikroštruktúra na rozhraní tepelne ovplyvnenej oblasti a zvarového kovu kde sa nachádza zväčšené množstvo polygonálneho feritu.



Obr. 48 Mikroštruktúra TOO a ZK oceli X12Cr13 [12].

3.5 Vyhodnotenie tvrdosti zvaru

Meranie tvrdosti bolo prevedené testom tvrdosti podľa Vickersa s nastaveným zaťažením HV 10. Na oboch vzorkách bolo prevedených dvanásť vpichov podľa schémy na obrázku 49. Päť vpichov boli vytvorené v osy zvaru, jeden vo zvare mimo osu, tri v tepelne ovplyvnenej oblasti a tri v základnom materiáli.



Obr. 49 Schéma merania tvrdosti ocele X12Cr13.

Namerané hodnoty mikrotvrdosti u oboch vzoriek sa skoro vôbec nelíšia. V oboch prípadoch boli namerané hodnoty najväčšie v tepelne ovplyvnenej oblasti, ktoré dosahovali hodnoty okolo 365 HV, čo mohlo byť spôsobené rýchlym chladením a tvorením tvrdých fázy. Najnižšie namerané hodnoty u oboch vzoriek boli v základnom materiáli okolo 260 HV. Hodnoty mikrotvrdosti zvaru sú uvedené v tabuľke 8 a tepelne ovplyvnenej oblasti a základného materiálu v tabuľke 9.

Tab. 8 Mikrotvrdosti zvaru.

	Zvar					
HV	1	2	3	4	5	6
Vzorka 1	349	347	346	325	334	347
Vzorka 2	342	345	340	335	335	344

Tab. 9 Mikrotvrdosti TOO a ZM.

	Tepelne ovplyvnená oblasť			Základný materiál		
HV	7	8	9	10	11	12
Vzorka 1	365	365	364	259	263	262
Vzorka 2	363	364	364	256	260	262

ZÁVER

Technológia Laserhybridu je technológia bežne využívaná napríklad v automobilovom alebo lodnom priemysle. Práca preskúmala možné využitie tejto technológie v menej bežných odvetviach priemyslu ako je ropných alebo energetický priemysel, napríklad pre opravu potrubí alebo zváranie lopatiek parných turbín.

Pomocou metódy Laserhybridu boli zvarené dva vzorky materiálu X12Cr13, ktoré boli zvarené pri rôznych parametroch na tupo. Oceľ X12Cr13 je žiaruvzdorná martenzitická oceľ používaná najmä v energetickom priemysle, vďaka dobre oxidačnej odolnosti, odolnosti voči korózii a zvláštnymi karbidotvornými a nitridotvornými prvkami zlepšujúcimi žiaruvzdornosť až do tepla 650 °C.

Vzorky boli zvarené pomocou robotického ramena a LaserHybridu na Ústavu prístrojovej techniky. Po zvarení boli uskutočnené metalografické výbrusy spolu so skúškami tvrdosti. Mikroštruktúra povrchu, hlavy a koreňa bola poskytnutá ústavom prístrojovej techniky ČAV.

Z experimentu je možné vypožorovať, že za použitia rovnakého priemeru zväzku laserového lúča vznikla rozdielna geometria zvarov pri použití rozdielnych parametrov, ako aj hlbší prievar, na pohľad estetickjší zvar pri vyššom výkone, väčšej rýchlosti zvárania a zníženom prúde, a napätí u vzorku 1. U vzorku 1 bolo vypočítané aj nižšie vnesené teplo. So zníženým výkonom a nižšou rýchlosťou u vzorky 2 bol vytvorený širší zvar s väčšou tepelne ovplyvnenou oblasťou avšak aj vzniknutým pórom, ktorý mohol byť vzniknúť zachyteným ochranného plynu v koreni. Z fotiek mikroštruktúry vidieť prevažne martenzitickú štruktúru s nízkym podielom feritu v zware, podobne aj na rozhraní tepelne ovplyvnenej oblasti kde sa už nachádza zväčšené množstvo polygonálneho feritu. Z vyhodnotenia tvrdosti nie je zjavný žiadny veľký rozdiel pri nastavení rozdielnych parametrov. Najväčšia tvrdosť bola nameraná v tepelne ovplyvnenej oblasti dosahujúca 365 HV. V osy zvaru je zjavný pokles tvrdosti smerom ku koreňu zvaru. Celková tvrdosť zvaru je približne o 80-100 HV väčšia ako tvrdosť základného materiálu.

Pre využitie v energetickom priemysle sa metóda Laserhybridu javí ako nádejná technológia najmä vďaka dobrej homogenite zvaru, vyšším zváracím rýchlostiam a lepšiemu prievaru ako konvenčné technológie. Pri ďalšom postupe budú potrebné väčšie skúmania a testy, použitia iného usporiadania, možné nastavenie iného režimu a optimalizácia zváracích parametrov.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Welding: Metallurgy. *Britannica* [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/welding/Forge-welding>
 2. *TWI Global* [online]. Great Abington: TWI, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com>
 3. The Future Of Welding And Welding Technology. *Pema Welding Automation* [online]. Loimaa: Teemu Tolonen, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://pemamek.com/discover/the-future-of-welding-and-welding-technology/>
 4. *Fronius* [online]. Praha: Fronius International, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding>
 5. Laser-Hybrid Welding Drives VW Improvements. *Welding Journal* [online]. Copenhagen: T. Graf, H. Staufer, 2002 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20081212054335/http://www.aws.org/wj/jan03/feature1.html>
 6. Image of HLAW-deposited clad material. In: *Laser Focus World* [online]. Nashville: Paul Denney, 2011 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://img.laserfocusworld.com/files/base/ebm/lfw/image/2022/07/JF_4_Figure_3.62c8743868c1a.png?auto=format,compress&fit=max&height=827.1&width=842.4
 7. BHADURI, A.K, T.P.S GILL, Shaju ALBERT, K SHANMUGAM a D.R IYER. Repair welding of cracked steam turbine blades using austenitic and martensitic stainless-steel consumables. *Nuclear Engineering and Design*. 2001/06/01, **206**(1), 249-259. Dostupné z: doi:10.1016/S0029-5493(00)00439-8
 8. GOWREESAN, Vamadevan, Dhimas ARIO, Hepy HANIFA a Wayne GREAVES. Weld Repair of Steam Turbine Rotor with 12 Cr Weld to Mitigate Corrosion Issues. *MATEC Web Conf.* 2019, **269**(1), 1-5. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926903007>
 9. STEAM TURBINES. In: *Plant Automation* [online]. Hyderabad: Ochre Media Pvt, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://industry.plantautomation-technology.com/suppliers/de-pretto-industrie-srl/products/steam-turbines-lg.jpg>
 10. X12Cr13, 1.4006, 17021. In: *Boden* [online]. Vsetín: BODEN - MATTE, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.boden.cz/en/goods/supplied-assortment/x12cr13-1-4006-17021-stainless-steel/>
 11. X12Cr13 (1.4006). In: *EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES* [online]. Kharkov: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database, 2011 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=79
 12. BALOGOVÁ, Rut, ed. *Zborník prednášok z konferencie Kvalita vo zváraní 2023*. 1. Bratislava: Výskumný ústav zvaračský, 2023.
 13. *LaserTherm* [online]. Vejpnice: LaserTherm, 2019 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/eng/>
 14. IPG Photonics. In: *Canadian Fabricating & Welding* [online]. Elgin: Rob Colman, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://cdn.canadianmetalworking.com/a/laser-welding-in-hand-1638809764.jpg?size=1000x1000>
 15. Pipe welding. In: *Adobe Stock* [online]. San Jose: Adobe, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://stock.adobe.com/cz/images/pipe-welding-the-connection-of-the-pipe-with-a-clamp-welder-performs-welding-work-semi-automatic-electric-arc-welding-mig-welding/320564310>
 16. Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Explained. *Fractory* [online]. Manchester: Fractory, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://fractory.com/shielded-metal-arc-welding/>
-

-
17. Metoda svařování MIG/MAG. *Schinkmann* [online]. Kosmonosy: Schinkmann, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
 18. Tungsten Inert Gas Arc Welding (TIG, GTAW). *SubsTech* [online]. Moscow: Dmitri Kopeliovich, 2012 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tungsten_inert_gas_arc_welding_tig_g_taw
 19. TIG Welding Pipe. In: *Welding Tips and Tricks* [online]. South Daytona: Jody Collier, 2007 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.weldingtipsandtricks.com/images/tig-welding-pipe-hotpass.jpg>
 20. Laser hybrid welding. *Kuka* [online]. Augsburg: KUKA, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/process-technologies/laser-hybrid-welding>
 21. KUBÍČEK, Jaroslav, Libor MRŇA Laserhybrid současnost a budoucnost laseru [Prezentácia], Brno: VUT v Brně, 2018
 22. SIGMUND, Marian. Technologie svařování [prednáška], Brno: VUT v Brně, 22. 9. 2022.
 23. MIG/MAG (CO₂). In: *Automig* [online]. Teplice: Migatronik CZ, 2020 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://automig.cz/typo3temp/pics/7463e79dcd.jpg>
 24. *Lincoln Electric* [online]. Cleveland: The Lincoln Electric Company, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/>
 25. AWS [online]. Miami: American Welding Society, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.aws.org/home>
 26. *MillerWelds* [online]. Appleton: Miller Electric Mfg., 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/>
 27. *The Fabricator* [online]. Elgin: FMA Communications, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/>
 28. Cold Metal Transfer Welding [CMT] – How It Works. *Welding Pros* [online]. Waukegan: Derek Mason, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://weldingpros.net/cold-metal-transfer-welding/>
 29. PMC PULSE MULTI CONTROL. *Rapid Welding* [online]. Portsmouth: Rapid Welding and Industrial Supplies, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.rapidwelding.com/files/4,066,015.pdf>
 30. Laser welding application examples. In: *Keyence* [online]. Itasca: KEYENCE CORPORATION, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.keyence.com/Images/ss_welding_1_mechanism_007_1861989.jpg
 31. *Amada Weld Tech* [online]. Puchheim: AMADA WELD TECH, 2020 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.amadaweldtech.eu>
 32. Laser mode types. In: *LaserChirp* [online]. Chicago: Steven Glover, 2016 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.laserchirp.com/wp-content/uploads/2016/07/Figure_1-e1467692584338.png
 33. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
 34. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi: Výroba a technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
-

-
35. Laser-Power Measurement Solves Challenges for Materials Processing. *Photonics* [online]. Pittsfield: John McCauley, 2014 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Laser-Power_Measurement_Solves_Challenges_for/p6/vo120/i765/a56475
 36. CO2 Lasers. *RP Photonics* [online]. Frauenfeld: RP Photonics, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html
 37. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
 38. Fiber Lasers:.. In: *Logilase Lasers* [online]. Concord: Logimation Technologies, 2016 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.logilase.com/fiber-lasers-1.html>
 39. Actually, what is a diode laser?. *Laserline* [online]. Mülheim: Laserline, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/diode-laser/>
 40. What is a Laser Diode? Construction, Working, Types and Applications. *Electrical Technology* [online]. Electrical Technology, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2022/08/laser-diode.html>
 41. Nové metody svařování: LASERHYBRID. *Svar Info* [online]. Jiří Tichý, 2009 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2009050102>
 42. ACHERJEE, Bappa. *Hybrid laser arc welding: State-of-art review*. Ranchi, 2017. Review. Birla Institute of Technology.
 43. OLSEN, Flemming Ove, ed. *Hybrid laser-arc welding*. 1. Oxford: Woodhead Publishing, 2009. ISBN 978-184-5693-701.
 44. KATAYAMA, Seiji, ed. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-264-9.
 45. KAH, Paul, Antti SALMINEN a Jukka MARTIKAINEN. *Assessment of different laser hybrid welding processes* [online]. Temecula, 2008 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289037677_Assessment_of_different_laser_hybrid_welding_processes#fullTextFileContent. Conference Paper. 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics.
 46. *Hybrid laser beam welding—Classification, characteristics, and applications* [online]. Dresden, 2006 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://pubs.aip.org/lia/jla/article/18/3/169/220956/Hybrid-laser-beam-welding-Classification>. RESEARCH ARTICLE. University of Technology at Dresden.
 47. Underwater Welding The Art of Mixing Fire and Water. *TSS* [online]. Chonburi: Thai Subsea Services, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.thaisubsea.com/2022/01/23/underwater-welding-art-of-fire-and-water/>
 48. ALAJMI, Esam F. a Ahmad A. ALQENAEI. Underwater Welding Techniques. *Journal of Engineering Research and Application* [online]. 2017, 2017, 2(7), 14-17 [cit. 2023-05-20]. ISSN 2248-9622. Dostupné z: doi:10.9790/9622- 0702031417
 49. Method of Dry Underwater Welding | Metallurgy. *Your Article Library* [online]. IAB TCF. CMP, 2021 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.yourarticlelibrary.com/welding/method-of-dry-underwater-welding-metallurgy/97947>
 50. How Does Underwater Welding Work? A Shocking Process Few Know. *Water Welders* [online]. Allentown: WaterWelders, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://waterwelders.com/underwater-welding-how-it-works/>
 51. OFEM, Usani Unoh. *Laser Assisted Arc Welding Process for Dry Hyperbaric Deep water Application* [online]. Cranfield, 2013 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/8265>. PhD Thesis. Cranfield University. Vedoucí práce Supriyo Ganguly and Stewart Williams.
-

-
52. MAG-Schweißverfahren. In: *Handschweissen* [online]. Deutschland: Handschweissen, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.handschweissen.eu/wp-content/uploads/2016/01/mag-schweissen.jpg>
 53. Princip vláknového laseru. In: *Leonardo technology* [online]. Hlohovec: Leonardo technology, 2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
 54. KUBÍČEK, Jaroslav. Svařitelnost korozivzdorných ocelí [Prezentácia], Brno: VUT v Brne, 2017
 55. VERMA, Ketan a Harish GARG. Underwater Welding-Recent Trends and Future Scope. *International Journal on Emerging Technologies*. 2012/01/01, **3**(1), 115-120.
 56. VASHISHTHA, Prashant, Reeta WATTAL, Sunil PANDEY a Neha BHADAURIA. Problems encountered in underwater welding and remedies- a review. *Materials Today: Proceedings*. 2022, **64**(1), 1433-1439. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.634>
 57. YLS-2000/20000-QCW. *IPG Photonics* [online]. Oxford (Massachusetts): IPG Photonics Corporation, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/126/FileAttachment/YLS-2000-20000-QCW+Datasheet.pdf>
 58. 2KW Fiber Laser Cutting Machine for Metal Sheet IPG 2000w Fiber Laser Cutter Machine. In: *Accurl* [online]. Anhui: Accurl, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.accurl.com/wp-content/uploads/2021/03/Laser-IPG-YLS-2000-watt-Laser-Source-for-2kw-accurl-laser-cutter.jpg>
 59. BÖHLER CN 13/4-MC. *Voestalpine* [online]. Düsseldorf: voestalpine Böhler Welding Group, 2014 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/29102015000000B_Boehler%20CN%2013%204-MC_sw.pdf
 60. Labotom-5. *Struers* [online]. Paris: Struers S.A.S., 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Cutting/Cutting-equipment/Labotom>
 61. Cortadora metalográfica Labotom-5. In: *Metalinspec* [online]. Monterrey: Metalinspec, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.metalinspec.com.mx/equipos/labotom-5>
 62. Saphir 330. *QATM* [online]. Mammelzen: ATM Qness, 2014 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.metalco.cz/user/upload/PDF%20soubory/Bro%C5%BEury/Brusky%20%201e%C5%A1ti%C4%8Dky/Saphir%20330_EN.pdf
 63. Leptadlo Nital 5% - kyselina dusičná na alkoholové bázi. *Metalco* [online]. Praha: Metalco Testing, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/leptadla/kyselina-dusicna--nital--5--1-ltr-alkohol/>
 64. Stereo mikroskopy s plynulým zoom SSM-3EC2. *Somet* [online]. Bílina: SOMET CZ, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://somet.cz/cz/stereo-mikroskopy-s-plynulym-zoom-ssm-3ec2>
 65. *Materiály pro namáhané svařované konstrukce výrobků provozované v tepelně energetických zařízeních: odborný seminář pro projektanty, konstruktéry, vyšší svářečský i inspekční personál, technology, revizní techniky, pracovníky NDT zkoušení, výrobce i provozovatele energetických zařízení : Brno, 16. prosince 2008 : [sborník přednášek]*. Brno: TDS Brno - SMS, 2008. ISBN 978-80-87102-01-5.
 66. PURMENSKÝ, Jaroslav a Vladimír KUDĚLKA. *Materiály pro energetiku*. 1. Brno: TESYDO, duben, 2023. ISBN 978-80-87102-35-0.
 67. EDEN, Anna a Riva SHAVER. *A Beginner's Guide to Become a Welder & Blacksmith*. 1. New York: Academic Pages, 2016. ISBN 978-1-280-13008-3.
-

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbole

Označenie	Legenda	Jednotka
$CrEq_{PM}$	Ekvivalent chrómu prídavného materiálu	[-]
$CrEq_{ZM}$	Ekvivalent chrómu základného materiálu	[-]
I	Prúd	[A]
$NiEq_{PM}$	Ekvivalent niklu prídavného materiálu	[-]
$NiEq_{ZM}$	Ekvivalent niklu základného materiálu	[-]
P	Výkon	[W]
Q	Celkové vnesené teplo	[kJ · mm ⁻¹]
Q_1	Celkové vnesení teplo vzorku 1	[kJ · mm ⁻¹]
Q_{Laser}	Vnesené teplo laser	[kJ · mm ⁻¹]
Q_{Laser1}	Vnesené teplo laseru vzorku 1	[kJ · mm ⁻¹]
Q_{MAG}	Vnesené teplo MAG	[kJ · mm ⁻¹]
Q_{MAG1}	Vnesené teplo MAG vzorku 1	[kJ · mm ⁻¹]
U	Napätie	[V]
v_s	Rýchlosť zvaru	[mm · s ⁻¹]
η	Účinnosť	[-]

Skratky

Označenie	Legenda
CMT	Cold Metal Transfer
LCS	Low Spatter Control
PMC	Pulse Multi Control
PWHT	Post Welding Heat Treatment

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 pWPS Laserhybrid vzorka 1
 - Príloha 2 pWPS Laserhybrid vzorka 2
 - Príloha 3 Materiálový list ocele X12Cr13
 - Príloha 4 Materiálový list prídavného materiálu BÖHLER CN 13/4-MC
-

VUT FSI Brno	WPS	Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu	WPS No./č.: WPS-VP/2/2023 Date/Datum 21.5.2023	Rev.: 0 Pg./Str.: 1/1			
Welding Process/Metoda: 1. 521 2. 135 Type of Weld/Typ svaru: BW - tupý spoj Backing/Podložka: N.A. Other/Ostatní: Welder Svářeč		Supporting/Související: WPQR					
Base metal / Základní materiál: Material 1: X12Cr13 (17021,1.4006) EN 10088-1,2 Group: 8 Outside Dia./Vnější Thickness/Teplota: 10 mm Material 2: X12Cr13 (17021,1.4006) EN 10088-1,2 Group Sk.: 8 Outside Dia./Vnější Thickness/Teplota: 10 mm Remark/Poznámka:							
Filler Material / Svařovací materiál: Classification: f. EN ISO 17 633-A, T 13 4 M M12 2 Classification: EN ISO 17 633-A, T 13 4 M M12 2 Designation: f. BÖHLER CN 13/4-MC FM4 (FM5) Designation: BÖHLER CN 13/4-MC FM4 (FM5) Size/Průměr: f. 1,2 mm 2. Name-Type of Flux/Úložný typ: Drying of F.M./Sušení svař. mat.: f. °C 2. Replace/Nahradit: f. 2.		Gas / Plyn: 6 f. Inin % Inin Shielding G. svaru: f. Ar 1-1 2. Backing/O. kofene: f. N.A. 2. Trailing/Codělač: f. N.A. 2. Remark/Poznámka: EN ISO 14175					
Position / Pozice: PA Groove/Do šlaku: f. 2. Fillet/Koutový: f. 2.		Joint Design / Tvar spoje:					
		Welding Sequences / Postup svařování: 					
Preheat / Předehřev:							
Preheat Temp./Teplota předehřevu: N.A. °C	Interpass: °C	Post Heating/Ohřev: N.A. °C h	Cooling After W./Ochlazení po s: still air / klidný vzduch	Temp. Control/Kontrola teploty: Remark/Poznámka:			
Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:							
Type/Typ: N.A.	Temperature/Teplota: °C	Time/Čas: min.	Heating Rate/Rychlost ohřevu: °C/h	Cooling Rate/Rychlost ochlazení: °C/h Remark/Poznámka:			
Technique / Technika svařování:							
Tungsten El./Wolframová elektroda: φ mm Type-	mechanical / mechanicky		Type of Bead/Tvar housanky: f. string - rovná 2.				
Edge Preparation/Připrava šlaku: mechanical / mechanicky	mechanical / mechanicky		Weaving / Rozkyv: f. N.A. 2.				
Method of Cleaning/Metoda čištění: mechanical / mechanicky	mechanical / mechanicky		Pulsing/Pulsace: f. N.A. 2.				
Method of Back Gouging/Drtákování kofene: mechanical / mechanicky	mechanical / mechanicky		Oscillation/Oscilace: f. N.A. 2.				
Welding Parameters / Svařovací parametry:							
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál Classification/Klasifikace	Type/Polárta Typ / Polárta	Amperage/Prúd (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat Input (kJ/mm) Teplotný příkon(kJ/mm)
1	521	-	DC/-	P=1200 W	-	9	0,04
2	135	1,2	DC/-	180	19	9	0,304
Remarks / Poznámky: Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.							
Prepared (Name, Date, Signature): 21.5.2023 Připravil (jméno, datum, podpis): Samuel Znášik			Approved (Name, Date, Signature): Schválil (jméno, datum, podpis):				

Grade :	X12Cr13
Number:	1.4006
Classification:	Martensitic stainless steel
Density:	7.7 g/cm ³
Standard:	<p>EN 10088-2: 2005 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes</p> <p>EN 10088-3: 2005 Stainless steels. Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes</p> <p>EN 10272: 2007 Stainless steel bars for pressure purposes</p> <p>EN 10263-5: 2001 Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion. Technical delivery conditions for stainless steels</p> <p>EN 10250-4: 2000 Open steel die forgings for general engineering purposes. Stainless steels</p> <p>EN 10297-2: 2005 Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes. Stainless steel. Technical delivery conditions</p> <p>EN 10088-1: 2005 Stainless steels. List of stainless steels</p> <p>EN 10088-4: 2009 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes</p> <p>EN 10088-5: 2009 Stainless steels. Technical delivery conditions for bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes</p>
Equivalent grades:	Go here

Chemical composition % of steel X12Cr13 (1.4006): EN 10088-2-2005

Tighter carbon ranges may be agreed at the time of enquiry and order
Particular ranges of sulphur content may provide improvement of particular properties. For machinability a controlled sulphur content of 0.015 % to 0.030% is recommended and permitted. For weldability, a controlled sulphur content of 0.008 % to 0.030 % is recommended and permitted. For polishability, a controlled sulphur content of 0.015 % max is recommended.
Elements not listed in this table shall not be intentionally added to the steel without the agreement of the purchaser except for finishing the cast.

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr
0.08 - 0.16	max 1	max 1.6	max 0.76	max 0.04	max 0.015	11.5 - 13.5

Mechanical properties of steel X12Cr13 (1.4006)

R_m - Tensile strength (MPa) (+QT650)	660-860
R_m - Tensile strength (MPa) (+A)	600
R_{p0.2} 0.2% proof strength (MPa) (+QT650)	460
KV - Impact energy (J) longitud.,	+20° 25
A - Min. elongation at fracture (%) (+QT)	12-16
Nominal diameter (mm):	2 - 100
Z - Reduction in cross section on fracture (%)	67-80
Brinell hardness (HB): (+A)	220

Properties of steel X12Cr13 (1.4006)

Resistance to intergranular corrosion - no



BÖHLER CN 13/4-MC

Metal cored wire, high alloyed, stainless

Classifications

EN ISO 17633-A	EN ISO 17633-B	AWS A5.9	AWS A5.22
T 13 4 M M12 2	TS 410NiMo-M M12 1	EC410NiMo (mod.)	EC410NiMo (mod.)

Characteristics and typical fields of application

Metal cored wire for the fabrication and repair welding of hydro turbine components made of soft martensitic 13 % Cr 4 % Ni alloyed steels and cast steels. BÖHLER CN 13/4-MC offers favourable spray arc or pulsarc characteristics, minimum spatter formation, flat and smooth bead profiles, excellent wetting behaviour and safe penetration. It is easy to operate in all welding positions. Additionally, precise alloy adjustment ensure very good impact test results of the heat treated weld metal. The hydrogen content is extra low (maximum 4 ml/100 g acc. to AWS conditions). Significant gains in productivity can be realized by higher deposition rates and reduced post weld grinding when compared to GMAW using solid wires.

Base materials

1.4317 GX4CrNi13-4, 1.4313 X3CrNiMo13-4, 1.4407 GX5CrNiMo13-4, 1.4414 GX4CrNiMo13-4
ACI Grade CA 6 NM

Typical analysis of all-weld metal (wt.-%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
wt.-%	≤ 0.025	0.7	0.9	12.0	4.6	0.6

Mechanical properties of all-weld metal

Condition	Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength R_m	Elongation A ($L_0=5d_0$)	Impact work ISO-V KV J	
	MPa	MPa	%	+20 °C	-20 °C
a	760 (≥ 500)	900 (≥ 760)	16 (≥ 15)	65	60 (≥ 47)
a1	730	860	17	68	62 (≥ 47)
a	annealed, 600°C / 2 h / furnace to 300 °C / air – shielding gas Argon + 2.5 % CO ₂				
a1	annealed, 580°C / 8 h / furnace to 300 °C / air – shielding gas Argon + 2.5 % CO ₂				

Operating data

	Polarity: DC (+)	Shielding gases: Argon + 2.5 % CO ₂	ø (mm)	Amps A	Voltage V
			1.2	130 – 370	16 – 38
			1.6	250 – 550	22 – 40

Welding with conventional or pulsed power sources (preferably slightly trailing torch position, angel appr. 80°). Recommended stick out 18 – 20 mm and length of arc 3 – 5 mm. Recommended preheating and interpass temperatures in case of heavy wall thicknesses are 100 – 160 °C. Maximum heat input 15 kJ / cm. Tempering at 580 – 620 °C.

Approvals

SEPROZ