

Štúdia laserového zvarovania medených zliatin s dôrazom na kvalitu spoja

Elena Kantoríková, Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: elena.kantorikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2763

Study of laser welding of copper alloys with emphasis on joint quality

Abstract: The article deals with the issue of laser welding of copper alloys and the analysis of the properties of the welded joint. The study compared selected technological parameters of the process, the procedure for creating the welded joint, and evaluated the technological properties of the welded material. The aim of the work is to contribute to a more effective setting of laser welding parameters and to improve the quality of the resulting welds of copper alloys.

Keywords: laser welding, mechanical properties, copper alloys.

ÚVOD

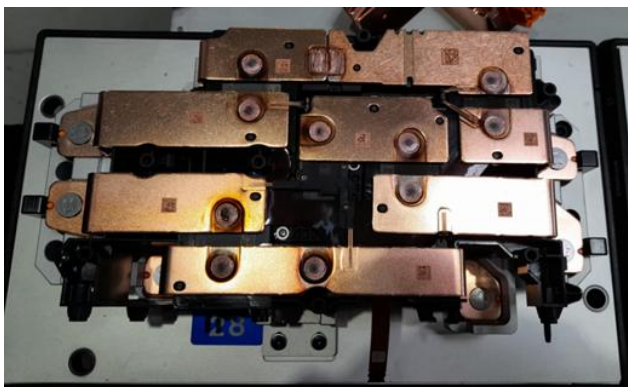
Laserové zvarovanie patrí medzi moderné a dynamicky sa rozvíjajúce technológie spájania kovových materiálov. Oproti tradičným zvaracím postupom prináša vyššiu presnosť, rýchlosť a jednoduchšiu integráciu do automatizovaných výrobných procesov [1]. Práve tieto vlastnosti umožnili jeho široké využitie v automobilovom, leteckom či elektrotechnickom priemysle, ako aj v ďalších technických oblastiach. Význam tejto metódy narastá najmä pri spracovaní materiálov so zhoršenou zvarateľnosťou, napríklad medených zliatin, ktoré sa vyznačujú vysokou tepelnou vodivosťou a nízkou schopnosťou pohlcovať laserové žiarenie. Pre dosiahnutie kvalitného zvarového spoja je potrebné presne nastaviť a kontrolovať technologické parametre procesu, medzi ktoré patrí výkon lasera, rýchlosť posuvu, poloha zaostrenia lúča, typ ochranného plynu a ďalšie faktory. Tieto parametre majú zásadný vplyv na kvalitu zvaru, jeho mikroštruktúru i mechanické vlastnosti [1, 2]. V aplikáciách, kde je rozhodujúca pevnosť a spoľahlivosť spoja, je preto optimalizácia procesných parametrov mimoriadne dôležitá. Laserové zvarovanie je moderná technológia, ktorá sa rýchlo rozvíja a má obrovský potenciál do budúcnosti, je technológiou, ktorá prináša mnoho výhod, ale zároveň si vyžaduje ďalšie inovácie a zlepšenia. Má veľký potenciál ovplyvniť budúcnosť výroby, a to najmä v oblastiach, kde je dôležitá presnosť a efektívnosť [2, 3]. Táto technológia je vhodná pre rôzne druhy materiálov a v porovnaní s tradičnými metódami je rýchlejšia, presnejšia a nákladovo efektívna, čo umožňuje

výrobu vo veľkom množstve. Známých je niekoľko rôznych typov laserového zvarovania.

1 LASEROVÉ ZVÁRANIE MEDI

Med' sa používa v širokej škále aplikácií, pretože je tvárna, výborný vodič elektrického prúdu aj tepla, takisto silno odráža laserové svetlo, najmä infračervené lasery. Preto je potrebné veľké množstvo energie, aby sa dosiahlo spájanie medi. Avšak, keď sa jej teplota zvyšuje, zvyšuje sa aj jej schopnosť absorbovať teplo, a pri bode tavenia sa *med'* stáva vysoko absorpčnou, čím sa výrazne zvyšuje riziko vytrysknutia roztaveného materiálu. Vysoká tepelná vodivosť *medi* spôsobuje, že sa veľmi ľahko deformuje a poškodí pri nadmernom tepelnom pôsobení. Spôsoby, ako tomu zabrániť, zahŕňajú použitie laserov s kratšími vlnovými dĺžkami alebo určitými farbami (zelená), ako aj pomalé zvyšovanie intenzity laserového výkonu [4]. *Med'* má taviacu sa zónu s nízkou viskozitou (oveľa nižšiu ako *ocel'* alebo *hlinik*) a je náchylná na zvlnenie a pohyb. *Med'* tiež rýchlo tuhne, čo vedie k zvarovým spojom s nepravidelnou morfológiou v porovnaní s inými materiálmi, ako je *ocel'*, a zlému vyplneniu zvarovej medzery. Pri *medi* spôsobuje samotný laser vlny a prúdy v taviacej sa zóne, čo následne vyvoláva turbulencie v celej zóne. Dosiahnuť ideálne zvary je náročné a vyžaduje vysokú presnosť nastavenia správnych parametrov zvarovania. Zvarové spoje z *medi* sú zvyčajne mäkké v porovnaní so základným materiálom, pretože *med'* nie je alotropná, tak nedochádza k fázovým transformáciám [4, 5].

Zváranie *medi* nachádza široké uplatnenie v rôznych priemyselných odvetviach vďaka jej výnimočnej elektrickej a tepelnej vodivosti.



Obr. 1. Zvary na experimentálnej súčiastke

V elektrotechnickom priemysle sa *medené* zvarané konštrukcie často využívajú pri výrobe konektorov, prípojnic či častí generátorov. Zváranie *medi* má svoje miesto aj v automobilovom priemysle, najmä pri výrobe radiátorov a komponentov chladiacich systémov. Tieto príklady poukazujú na všestrannosť *medi* a efektivitu zvaracích technológií pri zabezpečení spoľahlivých a mechanicky pevných spojov.

2 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Ako experimentálny materiál bola použitá valcovaná 99,9 % *med'* DIN 2.0060. Mechanické vlastnosti experimentálneho materiálu sú v tab. 1. Táto *med'* sa využíva v automobilovom priemysle, stavebných zariadeniach, spojovacích materiáloch, elektronike a elektrických zariadeniach. Sledovali sa dva typy zvarov: špirálový a obdĺžnikový.

Tab. 1. Mechanické vlastnosti

Stav materiálu	R220 (mäkký)	R240 (1/2 tvrdý)	R290 (3/4 tvrdý)
Hrúbka [mm]	0,1 ÷ 5	0,10 ÷ 10	0,10 ÷ 10
R_m [MPa]	220 ÷ 260	240 ÷ 300	290 ÷ 360
$R_{p0,2}$ [MPa]	max. 140	min. 180	min. 250
Ťažnosť [%]	33 %	8 %	4 %

Cieľom práce je analyzovať parametre laserového zvárania pri dvoch rôznych zvaroch. Vyhovujúce parametre, teda zvary, ktoré prešli ťahovými skúškami a parametre, pri ktorých pevnosť zvarov nebola dostatočná. Dôležitý ukazovateľ je pevnosť a elektrická vodivosť zvaru.

Zváranie vykonávalo zariadenie *TruDisk* pre oba typy tvaru zvaru. Výkon jadra pri špirálovom zvare a pri obdĺžnikovom bol totožný, a to až 75 %. Rýchlosť

zvárania pri špirále bol na hranici 70 mm·s⁻¹ a pri obdĺžniku okolo 75 mm·s⁻¹. Hĺbka prevarenia mala dosahovať hĺbku až okolo 3 mm. Tieto parametre sú uvedené v tab. 2. Pre porovnanie bol zvolený druhý parameter zvárania s výkonom 8000 W. Výkon jadra sa znížil pri špirálovom zvare na hranicu 60 % a pri obdĺžnikovom bol na úrovni 50%. Rýchlosť zvárania bola výrazne zvýšená, čo sa odzrkadlilo aj na vizuálnej stránke zvaru. Rýchlosť pri špirále dosahovala až 200 mm·s⁻¹ a pri obdĺžniku okolo 150 mm·s⁻¹. Zvýšením rýchlosti sa hĺbka prevarenia znížila na 1 mm.

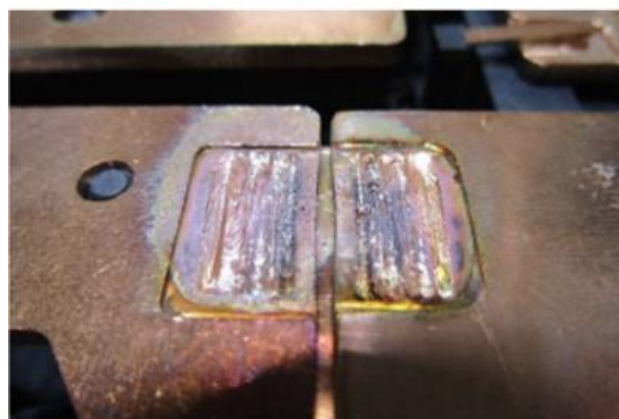
Tab. 2. Parametre zvárania

	1	2
Výkon lasera	6000 W	8000 W
Výkon jadra	75 %	60 %
Rýchlosť zvárania	70 mm·s ⁻¹	200 mm·s ⁻¹
Hĺbka prevarenia	cca 3 mm	cca 1 mm

Zvarové spoje je možné vidieť na obr. 2. a obr. 3. Laserové zvaracie zariadenie bolo nastavené na programy v dvoch tvaroch - špirála a obdĺžnik.



Obr. 2. Špirálové zvarové spoje.



Obr. 3. Pozdĺžne zvarové spoje

Pri všetkých parametroch zvárania bola pracovná vzdialenosť medzi laserom a súčiastkou 345 mm. Ochranný plyn pri tejto technológii nebol použitý. Podmienka pevnosti zvarov bola, aby vydržali zaťaženie 5000 N. Je veľmi dôležité, aby materiál, ktorý sa má zvärať, bol čistý a bez povrchových uhlíkov a oxidov.

Pre dosiahnutie ideálneho zvarového spoja je potrebné venovať pozornosť tiež správne obrábaniu, čisteniu, montáži a každému zaobchádzaniu s materiálom. Treba sa hlavne vyhnúť obrábacím metódam, ktoré zanechávajú zbrúsený alebo pošpinený povrch. Napríklad pásová píla zanechá povrch nerovnomerný a nevhodný pre zváranie. Tento problém možno riešiť dodatočným obrábaním hrany spoja po reze. Brúsenie a pieskovanie sú taktiež technológie, ktorým sa treba vyhnúť. Keďže je *meď* veľmi mäkký materiál, tieto technológie môžu spôsobiť zarytie nečistôt a rôznych prvkov do materiálu. Ak sa brúseniu vyhnúť nedá, tak sa odporúča použiť hrubý kotúč. Pre odstránenie nečistôt a uhlíkových zvyškov na *medených* dieloch možno zvyčajne odstrániť pomocou *acetónu* alebo iných rozpúšťadiel. Rozpúšťadlá obsahujúce chlór sa neodporúčajú, pretože pri zahrievaní môžu vytvárať toxické plyny [4, 5]. Výber správneho laserového zariadenia na zváranie *medi* je taktiež kľúčové pre dosiahnutie kvalitného zvaru s požadovanými vlastnosťami. Každý typ laseru, v závislosti od jeho vlnovej dĺžky, režimu (kontinuálny alebo pulzný) a nastaviteľných parametrov, ovplyvňuje efektívnosť zvárania a hlavne výsledný zvar požadovaných vlastností a kvality. Lasery s vhodnou vlnovou dĺžkou dosahujú lepšie spojenie s *medou* a znižujú riziko defektov a praskania. Použitie kontinuálneho laseru pomáha predchádzať praskaniu spôsobenému cyklickým ohrevom a chladením, ktorý je charakteristický pre pulzný režim. Správny výber laseru tak priamo prispieva k dosiahnutiu stabilného, homogénneho a pevného zvaru, čo je v praxi pri zváraní *medi* obzvlášť dôležité [6]. A keďže je zváranie *medi* a jej zliatin podstatne náročné, je potrebné zvoliť čo najideálnejšie parametre zvárania, ktoré sú závislé od viacerých aspektov, ako je napríklad zloženie zliatiny, hrúbka zváraného dielu alebo prostredie, v ktorom zváranie prebieha a mnoho ďalších faktorov.

3 HODNOTENIE

Špirálové zvarové spoje v rezoch mali viaceré nedostatky, ako je zvýšená pórovitosť a viacero studených spojov. Výsledky trhacích skúšok potvrdili, že tieto zvary neboli ani zďaleka dostatočne pevné a bolo nutné doladiť základné parametre laserového zvárania. Zvar pri prvom použití parametru narušoval vodivosť materiálu a pevnosť limitovala funkciu súčiastky. Obrázok 4 prezentuje

zvarové spoje po skúške ťahom, žltým krúžkom je označený nevyhovujúci zvar, zeleným je označený vyhovujúci.

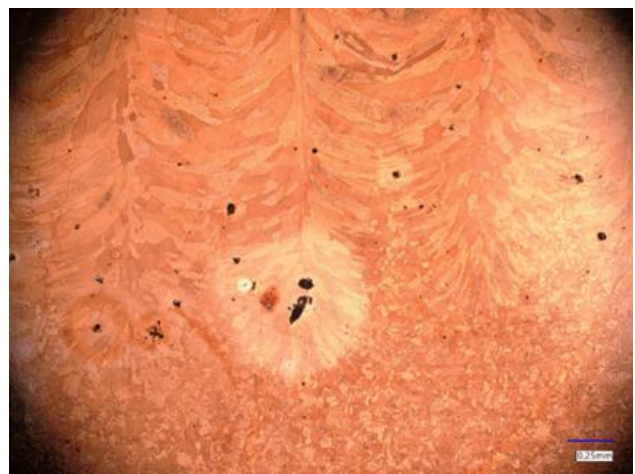


Obr. 4. Porovnanie zvarových spojov

Po viacerých neúspešných pokusoch pri zmene parametrov laserového zvárania sa pristúpilo aj ku väčšej zmene v programe. Hlavne pri špirálovom zvare nastali zásadné zmeny v tvare trajektórie laserového lúča a pribudlo viac špirál s cieľom získať pevnejší zvar. Zvar obdĺžnikového tvaru ostal takmer nezmenený.



Obr. 5. Mikroštruktúra zvarového spoja - špirálový tvar



Obr. 6. Mikroštruktúra zvarového spoja - obdĺžnikový tvar

Pri detailnej mikroštruktúrálnej analýze zvarového spoja bolo pozorovaných viacero pórov a drobných nepravidlostí, ktoré predstavujú vnútorné defekty

pravdepodobne vzniknuté v dôsledku nedostatočného odvádzania plynov počas procesu tuhnutia kovu. Napriek prítomnosti týchto chýb bola zistená dostatočná pevnosť zvaru. Mechanické vlastnosti boli overené meraním tvrdosti podľa *Vickersa*, pričom namerané hodnoty potvrdili homogénnu a uspokojivú tvrdosť v celom objeme spoja. Výsledky trhacích skúšok zároveň preukázali, že zvarené spoje vykazujú primeranú pevnosť pre požadované technické aplikácie. Zistená pórovitosť a lokálne defekty však môžu mať negatívny vplyv na elektrickú a tepelnú vodivosť materiálu, čo je potrebné zohľadniť pri hodnotení funkčných vlastností súčiastky. Zaujímavým javom je zväčšovanie hĺbky pretavenej oblasti smerom od stredu špirály. Tento jav možno vysvetliť akumuláciou tepla v materiáli počas zvárania - ako sa zvyšovala celková teplota v okolí zvarovej oblasti, dochádzalo k hlbšiemu pretaveniu základného materiálu. Tento efekt môže mať vplyv na tvar a rozmery tepelne ovplyvnenej oblasti (*TOO*) a môže byť výhodný z hľadiska postupného zlepšovania metalurgickej väzby.

Výsledky merania tvrdosti pre vzorku s obdĺžnikovým tvarom zvaru ukázali, že tvrdosť základného materiálu sa pohybovala v rozmedzí 65 ÷ 70 HV, zatiaľ čo tvrdosť samotného zvarového spoja dosahovala približne 55 HV. Z nameraných hodnôt vyplýva, že s približovaním sa k zvarovému spoju dochádzalo k postupnému poklesu tvrdosti. Naopak, smerom od spoja do oblasti základného materiálu sa hodnoty tvrdosti zvyšovali, až nadobudli takmer konštantnú úroveň. Pri vzorke so špirálovým tvarom zvaru boli zistené odlišné výsledky oproti prvej vzorke. Kým v prvom prípade boli spájané dva medené plechy, v tomto prípade išlo o spoj medzi medeným plechom a medeným valčekom. Tvrdosť plechu bola totožná s predchádzajúcou vzorkou, keďže išlo o rovnaký materiál. Tvrdosť valčeka sa pohybovala v rozmedzí 50 ÷ 55 HV, zatiaľ čo tvrdosť v oblasti zvaru dosahovala 55 ÷ 60 HV, čo naznačuje postupný pokles tvrdosti v rámci vzorky.

Rozdiely v hodnotách tvrdosti zváraných materiálov možno pripísať odlišnému typu tvárnenia. Plech bol valcovaný za studena, čím došlo k deformačnému spevneniu a zväčšeniu hustoty dislokácií v kryštálovej mriežke, čo viedlo k zvýšeniu tvrdosti. Naopak, valček bol vyrobený tvárnením zo žihanej tyče, ktorá vykazovala nižší stupeň deformačného spevnenia. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim výsledky mohla byť rozdielna rýchlosť prehrievania a ochladzovania - hrubší valček sa zahrieval a chladil pomalšie ako tenký plech, čo predĺžilo pôsobenie teplôt v oblasti rekryštalizácie a viedlo k vzniku mäkšej štruktúry.

Priemerné hodnoty tvrdosti zistené skúškou podľa *Vickersa* potvrdili tieto závery. Pre špirálový zvar bola nameraná priemerná tvrdosť 57,96 HV, zatiaľ čo pre obdĺžnikový zvar 60,56 HV. Napriek určitým

rozdielom medzi vzorkami, dosiahnuté hodnoty tvrdosti potvrdili, že tvrdosť zvarových oblastí bola postačujúca a súčiastka spĺňa požiadavky na jej funkciu. Tvrdosti v oblasti zvarov aj základných materiálov svedčia o vhodnosti zvolených zvaracích parametroch, technológií a materiálov navrhnutých pre dané aplikácie.

ZÁVER

V práci boli analyzované dva typy laserových zvarov. Optimalizáciou parametrov zvárania sa podarilo dosiahnuť požadovanú pevnosť nad 5000 N pri výkone lasera 8000 W, výkone jadra 40 % a rýchlosti zvárania 150 ÷ 180 mm·s⁻¹. Hĺbka prevarenia dosiahla približne 1 mm pri oboch zvaroch. Napriek výskytu menších pórov a vnútorných chýb bola celková pevnosť zvarov vyhovujúca. Tvrdosť sa pohybovala v rozmedzí 50 ÷ 60 HV v závislosti od tvaru spoja. Výsledky potvrdili, že oba typy zvarov sú technologicky realizovateľné a spĺňajú požiadavky pre priemyselné využitie, čím sa prispelo k optimalizácii procesu laserového zvárania medených súčiastok.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená projektom KEGA 003ŽU-4/2024 Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky.

LITERATÚRA

- [1] ORSZÁGH, V. (1975): *Zváranie medi a medených zliatin*. 2. vyd. Knihnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave. Bratislava: Alfa.
- [2] LASER WELDING TECHNOLOGY (2023): *Evolution history & Future Trend*. [Online] <https://www.megmeet-welding.com/en/news/Evolution-ofLaser-Welding-Technology>
- [3] EDMUND OPTICS. (2025): *Key Parameters of a Laser System*. Barrington (USA): Edmund Optics, [Online], <https://www.edmundoptics.com/knowledgecenter/application-notes/lasers/key-parameters-of-a-laser-system/>
- [4] BAISON (2024): *7 types of laser welding you need to know*. [Online], <https://baisonlaser.com/blog/types-of-laser-welding/>
- [5] DAVIS, J. R. (2001): *Copper and copper alloys*. Materials Park, OH: ASM International, VII, 652 s. ISBN 978-0-87170-726-0.
- [6] SABHADIYA, S. (2024): *What is Brass? - Its Properties, Types, and Uses*. The Engineering Choice. [Online], <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-brass-its-properties-types-and-uses/>