

Zváranie horčíkových zliatin koncentrovanými zdrojmi energie

Ing. Tomáš Kramár¹,

Vedúci práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy

Vedúci študijnej stáže: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

1)STU v Bratislave, MTF so sídlom v Trnave, Katedra zvárania a zlievarenstva J.Bottu
25,91724 Trnava, +421 918 038699

tomas_kramar@stuba.sk

Abstrakt

Príspevok sa zaoberá výskumom a pokrokom v oblasti metalurgického spájania horčíkových zliatin koncentrovanými zdrojmi energie, ako je zváranie laserovým a elektrónovým lúčom. Sú uvedené charakteristiky a použitie horčíkových zliatin, ako aj niektoré dôležité parametre laserového zvárania a zvárania elektrónovým lúčom. Z laserového zvárania sú riešené predovšetkým problémy spojené so zváraním na pevnolátkových Nd:YAG laseroch a plynových CO₂ laseroch. Cieľom tejto práce je zhodnotiť súčasný pokrok a poskytnúť základ pre ďalší výskum v oblasti zvárania horčíkových zliatin.

Kľúčové slová: zváranie laserovým lúčom, zváranie elektrónovým lúčom, horčíkové zliatiny, zvariteľnosť

1. Úvod

Súčasná situácia vyžadujú ekonomickejšie využitie vzácnych primárnych zdrojov energií. Jeden z hlavných cieľov pre ďalšie obdobie je znižovanie emisií a tým aj dopad vplyvu človeka na životné prostredie. Vývoj týmto smerom vyžaduje používanie ľahkých konštrukčných kovov. Znižovanie hmotností využívaním materiálov s vysokým pomerom pevnosť / hmotnosť sa preferuje najmä v automobilovom a leteckom priemysle. Možnosťami ako to dosiahnuť, môže byť napríklad využívanie progresívnych materiálov, zmena konštrukcie či odľahčenie dielov konštrukčne. Hlavné faktory ovplyvňujúce voľbu materiálu sú redukcia spotreby paliva, prevádzková bezpečnosť, korózne správanie, recyklácia, nízke výrobné náklady.

Horčíkové zliatiny ako doteraz najľahšie konštrukčné materiály používané v technickej praxi majú potenciál nahradiť oceľ a hliník v mnohých aplikáciách. Získavajú významné postavenie v kozmickom, leteckom, automobilovom priemysle alebo v elektronike. Horčíkové zliatiny sa využívajú taktiež v zariadeniach pre jadrovú energetiku kvôli nízkej tendencii absorbovať neutróny a dobrej tepelnej vodivosti.

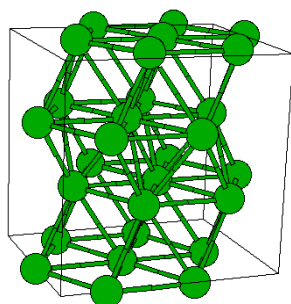
Horčík (latinsky magnesium Mg) má významné zastúpenie v zemskej kôre i vo vesmíre. Je to šiesty najrozšírenejší prvok v prírode, pričom predstavuje približne 2,5 % jej chemického zloženia. Zároveň je tretím najpočetnejším prvkom rozpusteným v morskej vode s koncentráciou približne 0,14 %. Koncentrácia horčíkových iónov v morskej vode sa udáva ako 1,35 g/l a je tak po sodíku druhým najčastejšie zastúpeným katiónom. Ako extrémne ľahké kovy (tab.1), vykazujú Mg zliatiny výbornú špecifickú pevnosť, schopnosť tlmenia nárazov, dobrú zlievateľnosť, výbornú obrobiteľnosť a recyklovateľnosť. Vo všeobecnosti majú Mg zliatiny približne rovnakú koróznú odolnosť v bežných prostrediach ako mäkké

ocele, ale sú menej odolné proti korózii v porovnaní s Al zliatinami. Súčasný rozvoj v oblasti vysoko čistých horčíkových zliatin taktiež výrazne zlepšil ich koróznou odolnosť [1,2].

Tab. 1 Fyzikálne vlastnosti Ti, Mg, Al a Fe [3,4]

	Ti	Mg	Al	Fe
Ionizačná energia (eV)	6.8	7.6	6	7.8
Merná tepelná kapacita ($J.kg^{-1}.K$)	540	1360	1080	795
Merné skupenské teplo tavenia ($J.kg^{-1}$)	4.2×10^5	3.7×10^5	4×10^5	2.7×10^5
Teplota tavenia ($^{\circ}C$)	1 666	650	660	1536
Teplota varu ($^{\circ}C$)	3 287	1090	2520	2860
Povrchové napätie ($N.m^{-1}$)	0.855	0,559	0.914	1.872
Tepelná vodivosť ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	20	78	94.03	38
Súčiniteľ teplotnej vodivosti ($m^2.s^{-1}$)	5.0×10^{-6}	3.73×10^{-5}	3.65×10^{-5}	6.80×10^{-6}
Koeficient tepelnej rozťažnosti (K^{-1})	8.5×10^{-6}	25×10^{-6}	24×10^{-6}	10×10^{-6}
Hustota ($kg.m^{-3}$)	4.506	1590	2385	7015
Elektrický odpor ($\mu\Omega.m$)	0.420	0.274	0.2425	1.386

Horčík je jedným z kovov alkalických zemín. Nemá alotropickú premenu, vyskytuje sa iba v HCP štruktúre (najtesnejšie hexagonálne usporiadanie). Ako konštrukčný kov je nevhodný, ale čistý horčík sa používa na legovanie ostatných zliatin (hlavne hliníkových), ako redukčné činidlo pri výrobe Ti a pre modifikáciu liatiny [5]. Nízka pevnosť a ťažnosť pôsobia nepriaznivo na jeho mechanické vlastnosti, čo spôsobuje jeho kryštalická štruktúra (obr.1) [6].



Obr. 1 Kryštalová mriežka čistého horčíka [7]

1.1. Charakteristika Mg zliatin

V súčasnosti tvoria odlievané Mg zliatiny cca. 85 až 90 % produktov z Mg zliatin vyrobených v Európe. Najpoužívanějšími sú zliatiny AZ 31 a AZ 91 s obsahom 3 %, resp. 9 % Al a cca. 1 % Zn. Ďalšími sú AM 50 a AM 60 s obsahom 5 a 6 % Al a prísadou Mn [8].

Horčík a jeho zliatiny sa stále častejšie používajú v rôznych aplikáciách (obr. 2), vrátane leteckého a automobilového priemyslu, ako aj v chemickom priemysle. Približne 1/3 produkcie Mg smeruje do výroby horčíkových odliatkov približne 1/2 produkcie sa vyžíva na legovanie Al zliatin a treťou oblasťou použitia je oceliarsky priemysel, v ktorom sa Mg používa na odstránenie voľnej síry [8].



Obr. 2 Aplikácie Mg zliatin v praxi [9]

Zliatiny horčíka sú charakteristické výhodnou závislosťou medzi pevnosťou v ťahu od 160 do 365 MPa, modulom pružnosti (45 GPa) a hustotou ($1,74 g.cm^{-3}$). Mg zliatiny majú vysoký pomer pevnosť/hmotnosť v porovnaní s ostatnými zliatinami. Hustota Mg ($1,7 g.cm^{-3}$) je len 2/3 hustoty Al ($2,74 g.cm^{-3}$) [10]. Navyše, Mg má relatívne dobrú elektrickú a tepelnú

vodivosť. Ďalšími výhodami sú dobrá obrobitelnosť a vysoká schopnosť tlmenia vibrácií. Základné Mg zliatiny obsahujú Al, Zn, Zr, Mn a prvky vzácnych zemín, ktoré umožňujú získanie požadovaných vlastností [11].

1.2 Zvariteľnosť Mg zliatin

Zvariteľnosť horčikových zliatin laserovým a elektrónovým lúčom nie je dostatočne preskúmaná. Výskum stability pri zváraní si vyžaduje identifikáciu a riadenie technologických parametrov ovplyvňujúcich proces stability a reprodukovateľnosti, tak aby bolo možné vyhotoviť pri vysokých rýchlostiach zvárania zvarové spoje bez výskytu defektov.

Na vyhotovenie zvarových spojov horčikových zliatin vysoko produktívnymi technológiami, s vysokou kvalitou pri relatívne nízkych nákladoch, s možnosťou predikcie kvality a reprodukovateľnosťou je nevyhnutný systematický výskum vhodných zváracích procesov.

Dôležité je charakterizovať významné parametre zvárania a ich vplyv na kvalitu zvarových spojov. Charakterizovať štruktúrne a metalurgické defekty súvisiace so zváraním Mg zliatin, ako sú póry, trhliny, oxidické inklúzie a zníženie obsahu legujúcich prvkov. Charakterizovať mechanické vlastnosti zvarových spojov, hlavne tvrdosť, pevnosť v ťahu, únavovú pevnosť a pod. Zvariteľnosť vybraných Mg zliatin je uvedená v tab. 2.

Tab. 2 Zvariteľnosť Mg zliatin [12]

Materiál	Trieda	Relatívna zvariteľnosť
Mg zliatiny na odlievanie	AM100A	B
	AZ63A	C
	AZ81A	B
	AZ91AC	B
	AZ92A	B
	EK30A	B
	EK41A	B
	EZ33A	A
	HK31A	B
	HZ32A	C
	K1A	A
	QE22A	B
	ZE41A	C
	ZH62A	C
	ZK51A	D
	ZK61A	D
	AZ10A	A
	AZ31B	A
AZ61A	B	
AZ80A	B	
Mg zliatiny na tvárnenie	HK31A	A
	HM21A	A
	HM31A	A
	ZE10A	B

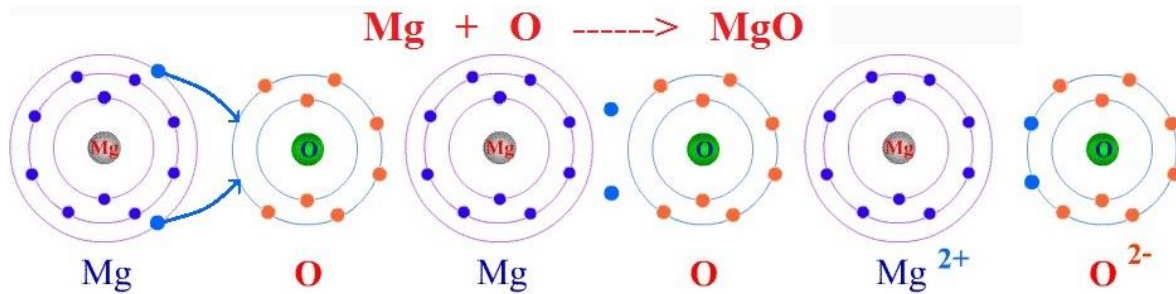
Poznámka: A - veľmi dobrá; B - dobrá; C - dostatočná; D - nedostatočná

Horčík a jeho zliatiny majú špecifické fyzikálne a chemické vlastnosti, ktoré významne ovplyvňujú zvariteľnosť materiálu. Ide hlavne o nízku teplotu tavenia a varu, nízke povrchové napätia, vysoký koeficient tepelnej vodivosti a vysoký koeficient teplotnej rozťažnosti. Tieto vybrané vlastnosti sú podobné hliníkovým zliatinám, preto sú podmienky pre zváranie prakticky totožné [13,14,15].

Čistota zvarových plôch je dôležitá pri akomkoľvek druhu zvárania. Väčšina horčikových zliatin sa v súčasnosti dodáva v olejovom zábale, morenom či oxidovanom stave, preto je potrebné tieto zliatiny najprv odmastiť a očistiť pomocou roztoku Na_2CO_3 , alebo NaOH a vodou pri teplote 90-100°C (pH>11). Prítomnosť oxidov znižuje zmačavosť zvarového kovu [16].

Horčík je kov veľmi reaktívny, čo spôsobuje že sa zlučuje s kyslíkom (obr. 3) a hlavne pri vysokých teplotách dochádza k veľmi vysokej rýchlosti oxidácii. Teplota tavenia oxidov na

povrchu materiálu je vyššia ako teplota tavenia samotného horčička, a preto je pred zváraním nutné ju odstrániť a zvärať v inertnej atmosfére (Ar, He). Z dôvodu vysokej teplotnej vodivosti horčíkových zliatin je pre ich zváranie nutné používať zdroj veľmi vysokého výkonu, čo môže viesť k nadmernému zhrubnutiu zrna. Vysoká tepelná vodivosť spôsobuje vznik teplotných napätových polí, ktoré môžu viesť k deformácii zvarového spoja. Na hraniciach zŕn dochádza k formovaniu nízko tavitelných eutektík, ktoré zvyšujú náchylnosť na vznik trhlín za tepla [17].



Obr. 3 Oxidácia horčička [18]

1.3 Laserové zvárania Mg zliatin

V oblasti riešenia zvariteľnosti Mg zliatin, prebieha výskum v mnohých vedeckých a výskumných pracoviskách. V súčasnej dobe sa výskum zameriava predovšetkým na nasledujúce metódy zvárania: oblúčkové zváranie, zváranie elektrónovým lúčom, zváranie laserovým lúčom, hybridné laserovo-oblúčkové zváranie a FSW [9,15].

Oblúčkové zváranie (GMAW a GTAW) sa zaraďuje medzi konvenčné metódy zvárania. Použitím prídavného materiálu možno zmeniť chemické zloženie zvarového kovu, mikroštruktúru a tým dosiahnuť zlepšenie mechanických vlastností zvaru. Nedostatkomb oblúčkového zvárania je nízka hustota výkonu a vysoký tepelný príkon. Vysoký tepelný príkon môže spôsobiť stratu legujúcich prvkov, väčšiu šírku TOO, zhoršenie vlastností základného kovu, zvyškové napätia a deformácie. Navyše zvary sú náchylné na pórovitosť a horúce praskanie [13].

Hybridné zváranie laser - GMAW, príp. laser - GTAW naplno využíva interakciu medzi laserovým lúčom a elektrickým oblúkom a môže vyriešiť niektoré problémy, ktoré existujú pri jednotlivých technológiách zvárania. Pri hybridnom zváraní sa zlepšuje absorpcia laserového lúča základným materiálom v tuhom stave a zvyšuje sa stabilita horenia oblúka. Táto metóda môže zaisťiť hlboký prievar, dobrý koeficient formy zvaru, vysokú rýchlosť zvárania, možnosť zvärať materiály s väčšou zvarovou medzerou a zníženie pórovitosti a citlivosti zvarových spojov na praskanie. Nevýhodou hybridného zvárania je veľké množstvo parametrov, ktoré je potrebné nastaviť a riadiť. Okrem toho pridanie oblúka spôsobí širšiu TOO, veľké deformácie a rôzne iné defekty, spôsobené väčším tepelným príkonom [1].

Zváranie laserom je charakterizované ako zváranie koncentrovaným zdrojom energie a vysokou účinnosťou. Tejto metóde zvárania je v súčasnosti venovaná veľká pozornosť. V porovnaní s inými metódami, má laserové zváranie Mg zliatin tieto výhody:

- vysoká hustota výkonu, málo vneseného tepla, úzka TOO a zvarový kov, pomer hĺbka : šírka zvaru je až 10:1, malé deformácie pri zváraní hrubých plechov,
- malé napätia vo zvare a pretvorenia môžu znížiť tvorbu trhlín za tepla,
- vysoká rýchlosť zvárania, vysoká rýchlosť ochladzovania, jemnozrnná štruktúra zvarov,
- malý objem nataveného zvarového kovu znižuje pravdepodobnosť kolapsu zvarového kúpeľa vzhľadom k nízkemu povrchovému napätiu roztaveného kovu,
- laserový lúč je možné prepravovať pomocou optických systémov a vlákien,

- umožňuje automatické zváranie a presné ovládanie. Za pomoci počítačov a ovládačov je možné zvärať zložené 3D súčiastky,
- laserový lúč nie je ovplyvnený elektromagnetickým poľom a nepotrebuje komplexné vákuové komory [1, 19, 20].

Pri zváraní horčikových zliatin laserom je preto možné naraziť na určité problémy pri spracovaní a chyby zvaru ako:

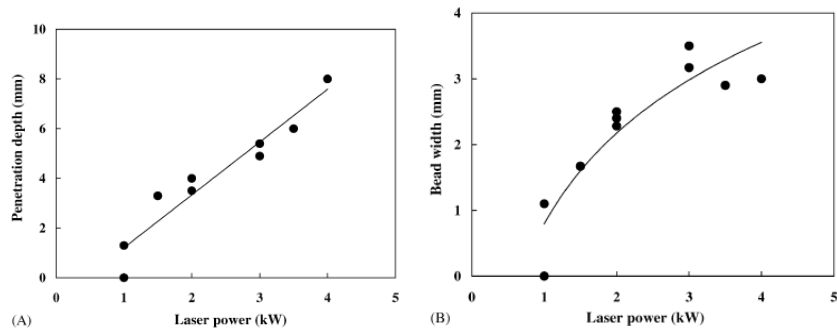
- nestabilný zvarový kúpeľ,
- výrazný rozstrek,
- sklon k prevaleniu pri veľkých zvarových kúpeľoch,
- oxidické inklúzie,
- preliačený zvarový kúpeľ (predovšetkým pri hrubých materiáloch),
- zápal,
- pokles obsahu legúr,
- nadmerná tvorba pórov (najmä pri odliatkoch),
- kryštalizačné a likvačné praskanie [1, 19].

Aj napriek tomu je možné vyrobiť laserové zvarové spoje pomocou vhodných podmienok zvárania u tvárnených horčikových zliatin bez výskytu trhlín, s nízkou pórovitosťou a dobrou kvalitou povrchu. Zvariteľnosť tlakových odliatých horčikových zliatin (najmä pri komponentoch, ktoré nie sú odliate vo vákuu) je výrazne závislá od obsahu plynov, pretože plyny môžu vytvárať ďalšie póry a dokonca zapríčiniť vzplanutie zvarového kúpeľa [1].

1.4 CO₂ a Nd:YAG lasery

Dva hlavné typy laserov, a to CO₂ lasery a Nd:YAG lasery s vlnovými dĺžkami 10,6 a 1,06 μm sa dosiaľ použili na zisťovanie zvariteľnosti Mg zliatin. CO₂ laser má vysoký výstupný výkon, vysokú účinnosť, osvedčenú spoľahlivosť a bezpečnosť. Spolu so súčasným vývojom vysokovýkonných zariadení, zlepšením kvality lúča a možnosťou vedenia lúča optickými vláknami vstúpil Nd:YAG laser do oblasti, v ktorej dominovali CO₂ lasery. Bolo publikované, že zvariteľnosť horčikových zliatin je podstatne lepšia pri použití Nd:YAG laserov kvôli kratšej vlnovej dĺžke, čo následne vedie k zníženej medznej intenzite žiarenia požadovanej pre vznik paroplynového kanála a produkcii stabilnejšieho zvarového kúpeľa. Nd:YAG lasery majú v porovnaní s CO₂ lasermi vyššiu účinnosť pri zváraní. Napríklad pri použití laserového lúča výkonu 1,5 kW s rovnakým priemerom stopy a rýchlosťou zvárania (5 m/min) bola dosiahnutá hĺbka penetrácie v prípade Nd:YAG lasera 2 mm a len 0,7 mm pri použití CO₂ lasera. Podobný záver dosiahli aj Sanders a kol. [21], ktorí porovnávali zvariteľnosť tvárnenej zliatiny AZ31B-H24 hrúbky 1,8 mm pomocou 2 kW pulzného Nd:YAG lasera a 6 kW kontinuálneho CO₂ lasera. Zvary bez defektov boli vyrobené Nd:YAG laserom pri výkone 0,8 kW (dĺžka trvania pulzu 5 ms a frekvencia 120 Hz) a rýchlosti zvárania 3 cm/s kým pri zváraní CO₂ laserom boli zvary bez defektov vyrobené pri výkone 2,5 kW a rýchlosti 12,7 cm/s [1].

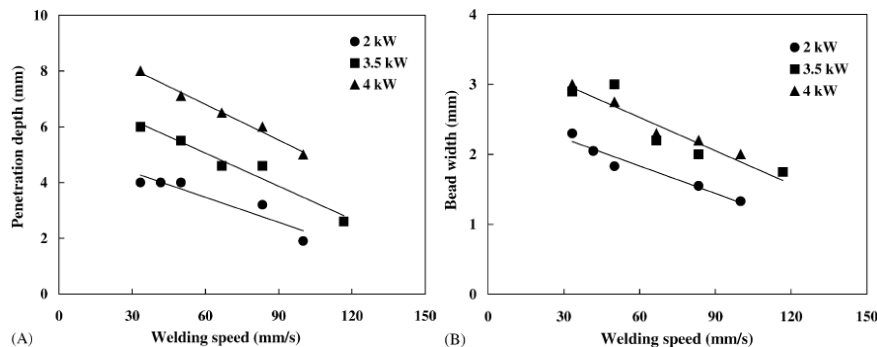
Vysoká hustota výkonu na zváranom materiály je rozhodujúcou pre dosiahnutie zvaru s hlbokým pretavením. Obr. 4 ukazuje vplyv výkonu lasera na hĺbku pretavenia a šírku zvaru na zliatine WE43 zvarenej pri rýchlosti 33 mm/s a priemere ohniska 0,25 mm [1].



Obr. 4 Vplyv výkonu CO_2 lasera na (A) hĺbku penetrácie, (B) šírku zvarovej húsenice na zliatine WE43 [1]

Bolo potvrdené, že menší výkon a rýchlosť zvárania má za následok zvary lepšej kvality. Optimálna úroveň výkonu Nd:YAG lasera pre zváranie tlakovo odlietavých zliatin AZ91 a AM50 s hrúbkami 3 a 5 mm leží v intervale medzi 2 a 2,5 kW. Pokles pevnosti v ťahu bol zistený pri výkone Nd:YAG lasera menšom ako 2 kW [1].

Obr. 5a a 5b ukazujú vplyv rýchlosti zvárania na hĺbku pretavenia a šírku zvaru pri rôznych výkonoch CO_2 a Nd:YAG lasera. Hĺbka penetrácie a šírka zvaru klesajú lineárne so zvyšovaním rýchlosti zvárania. Avšak, zváranie CO_2 laserom s výkonu 5 kW zliatin WE43 a ZE41 naznačuje, že ďalší pokles v rýchlosti zvárania vedie k miernemu nárastu hĺbky pretavenia a nárastu šírky zvaru a TOO [1].



Obr. 5 Vplyv rýchlosti zvárania na (A) hĺbku pretavenia a (B) šírku zvaru na zliatine WE43 zvarenej CO_2 laserom [1]

1.5 Zváranie horčíkových zliatin elektrónovým lúčom

Vo všeobecnosti všetky kovy a zliatiny, ktoré možno zvärať tavným zváraním, možno zvärať aj elektrónovým lúčom. Ide o podobné alebo rôznorodé kovy, ktoré sa zvárajú pokiaľ sú metalurgicky kompatibilné (tab. 7). Úzka oblasť zvaru a zváranie vo vysokom vákuu dáva týmto spojom veľmi dobré vlastnosti. Pokiaľ sú kovy náchylné na horúce praskanie, môže sa toto objaviť aj pri zváraní elektrónovým lúčom, ale v menšej miere. Zvlášť treba upozorniť na potrebu metalurgickej čistoty. Kovy a zliatiny obsahujúce viac nečistôt, či už vo forme inklúzií alebo plynov, môžu vytvárať pri určitých parametroch zvárania póry a studené spoje [16, 22].

Elektrónovým lúčom možno zvärať všetky kovové materiály, vrátane čistých kovov a zliatin. Jedinou podmienkou úspešného zvárania je vodivosť materiálov a ich ukostrenie, aby nedošlo k vzniku elektrostatického náboja. Pri zváraní nie je nutné použitie prídavného materiálu a rôzne hrúbky možno zvariť na jednu vrstvu zvaru [16].

Väčšinu horčíkových zliatin možno zvärať bez problémov. V niektorých prípadoch však môže dôjsť k selektívnemu odparovaniu niektorých prísad, čo môže zmeniť chemické

zloženie zvaru a následne aj jeho správanie sa počas zvárania (praskanie, pórovanie) a vlastnosti. Horčíkové zliatiny treba pred vlastným zváraním dokonale očistiť [16].

Tab. 3 Tabuľka zobrazujúca zvariteľnosť vybraných materiálov s horčíkom [16, 23]

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Mn
Mg	X	C	X	X	S	X	X	X	D	D	X
	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Mg	N	X	X	X	N	X	N	D	N	D	D

X = tvorba intermetalických zlúčenín – nevhodná kombinácia,

S = existencia tuhého roztoku – mimoriadne vhodná kombinácia na zváranie,

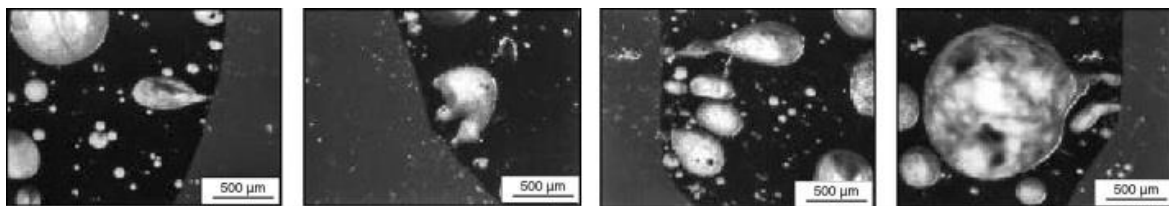
C = vznik zložitých štruktúr,

D = nie sú k dispozícii dostatočné údaje na hodnotenie,

N = použiť s vysokou pozornosťou, nie sú k dispozícii žiadne údaje.

2. Súčasný stav zvárania horčíkových zliatin laserovým a elektrónovým lúčom

Cao X. a kolektív z leteckého výskumného centra „Aerospace Manufacturing Technology Centre“ v Kanade z rôznych pohľadov kriticky preskúmali zvariteľnosť horčíkových zliatin CO₂ a Nd:YAG laserom. V práci boli riešené niektoré dôležité parametre zvárania laserom a ich vplyv na kvalitu zvaru. Sú popísané mikroštruktúry a metalurgické defekty, na ktoré je možné naraziť pri laserovom zváraní horčíkových zliatin, ako napr. pórovitosť, praskanie, oxidické inklúzie a pokles legujúcich prvkov (obr. 6).

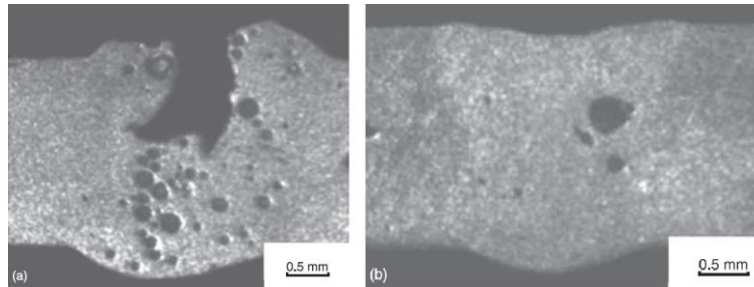


Obr. 6 Tvorba veľkých pórov v ZK spôsobená expanziou plynov a zlúčením vopred prítomných pórov v zliatine AM60B [1]

Zvarové spoje bez výskytu trhlín s nízkou pórovitosťou a dobrou kvalitou povrchu možno vyhotoviť použitím vhodných parametrov procesu laserového zvárania v prípade niektorých horčíkových zliatin, najmä tvárnených [1].



Shan J., z univerzity „Tsinghua University“ v Číne skúmal aká vysoká hustota výkonu laserového lúča umožňuje redukovanie množstva zvarových chýb vznikajúcich pri zváraní konvenčnými metódami zvárania. Aj keď bola preukázaná väčšia kvalita zvarových spojov pri zváraní laserovým lúčom, aj napriek tomu boli pozorované chyby vo zvaroch, na čo významne vplýval typ horčíkovej zliatiny. Existuje mnoho typov horčíkových zliatin a jednotlivé legujúce prvky vplývajú na technologický postup zvárania danej zliatiny. Pri tvárnených horčíkových zliatinách boli pozorované predovšetkým chyby ako nesprávne formovanie povrchu zvaru a praskliny, hlavné chyby pri zváraní horčíkových zliatin odlievaných do pieskovej formy boli praskliny a pórovitosť. Všeobecne v odlievaných horčíkových zliatinách bol pozorovaný ako hlavný problém veľký výskyt pórov. V práci bol ďalej skúmaný vplyv predhrevu na pórovitosť zvarových spojov (obr. 7) [24].



Obr. 7 Laserom zváraná horčíková zliatina AM50: a) bez predhrevu, b) s predhrevom [24]



Výskum v oblasti metalurgického spájania horčíkových zliatin prebiehajúci na „Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik“ na Technickej univerzite Clausthal v Clausthal-Zellerfeld je zameraný na zváranie 2,5 kW CO₂ laserom horčíkových zliatin rôznych hrúbok (2,5 – 8 mm). Zvary vo všeobecnosti mali iba malú pórovitosť a vhodnými parametrami bola dosiahnutá vyhovujúca kvalita povrchu. Vo všeobecnosti platí, že laserové zváranie nevedlo k žiadnej alebo malej zmene tvrdosti v oblasti zvarového kovu (ZK) a teplom ovplyvnenej oblasti (TOO) oproti základnému kovu. Menej potešujúce výsledky boli dosiahnuté pri zváraní odliatkov z QE22 zliatiny. Bolo pozorované praskanie zvarového spoja a podstatné zníženie tvrdosti. Navyše tlakovo odlievané odliatky preukázali vysokú úroveň pórovitosti [25].



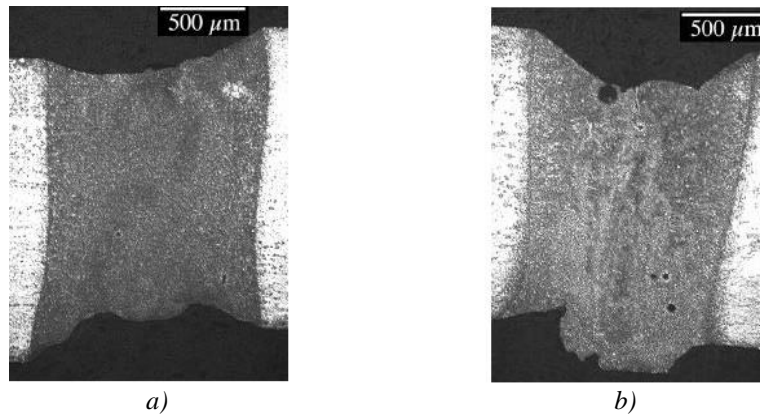
Lehner C. a kolektív z “Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften” v Mníchove viedli výskum vplyvu výkonu a rýchlosti CO₂ a Nd: YAG laserov na zvariteľnosť horčíkových zliatin (AZ91, AM50). Bolo dokázané, že nižšie hodnoty výkonu a rýchlosti lasera poskytujú lepšiu kvalitu zvarového spoja. Pre liate horčíkové zliatiny AZ91 a AM50 s hrúbkou 3-5 mm je doporučený Nd:YAG laser s výkonom 2-2,5 kW [26].



Na univerzite „Pennsylvania State University“ Zhao H. a Debroy T. pozorovali ako aj v predošlých prípadoch primárny problém pri zváraní horčíkových zliatin pórovitosť. V tejto štúdiu [27] bola snaha identifikovať mechanizmus vzniku pórov vo zvarovom kove a spôsob ako zamedziť ich tvorbe pri zváraní Nd: YAG laserom u tlakovo odlievaných AM60B zliatin. Na rozdiel od laserového zvárania hliníkových zliatin, kde bol hlavnou príčinou pórovitosti keyhole režim, pri zváraní horčíkovej zliatiny AM60B bola príčina pórovitosti iná. Zvyšujúca sa pórovitosť bola dôsledkom narastajúceho teplotného príkonu, t.j. zvyšujúci sa výkon a znižujúca rýchlosť zvárania. Zistilo sa, že správne zvolené parametre zvárania vedú k zníženiu až odstráneniu pórov vo zvarovom spoji [27].



Leong K.H. a kolektív z technologického vývojového strediska „Argonne National Laboratory“ v štáte Illinois skúmali zvariteľnosť horčíkovej zliatiny AZ31B s vysoko výkonným CW CO₂ a pulzným Nd: YAG laserom. Nízka viskozita a povrchové napätie, vysoký oxidačný potenciál zvarového kúpeľa horčíkovej zliatiny spôsobovali problémy pri zváraní týchto materiálov v porovnaní s oceľou (obr. 8). Bolo zistené, že zvariteľnosť horčíkovej zliatiny AZ 31B pomocou Nd: YAG lasera je podstatne lepšia. Dôvod lepšej zvariteľnosti bol pripísaný lepšej absorpcii žiarenia horčíkovou zliatinou ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) ako v prípade CO₂ lasera ($10,6 \mu\text{m}$) [28].

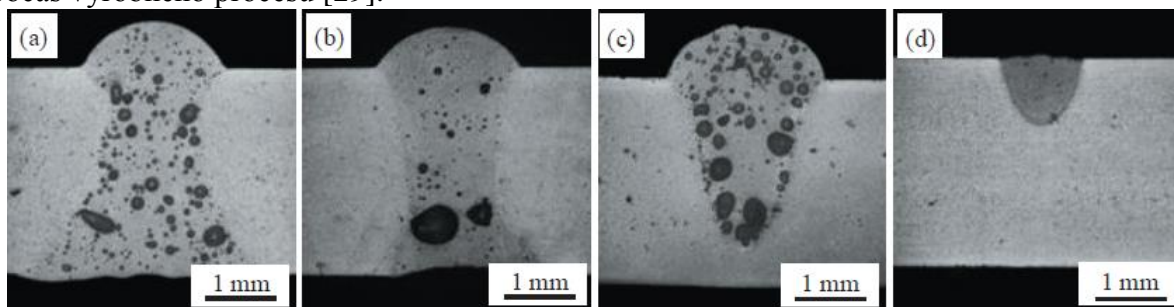


Obr. 8 Makroštruktúra zvarového spoja horčíkovej zliatiny AZ31B: a) zvárané v impulznom režime Nd: YAG laserom, b) zvárané CW CO₂ laserom (póry a trhlina v strede zvarového spoja sú evidentné)[28]

Chemická analýza zvarov preukázala zmeny v zložení zvarového kovu v porovnaní so základným materiálom. Kvôli nízkej teplote varu a vysokému vyparovacímu tlaku horčička a zinku, tieto prvky sa prednostne vyparujú počas zvárania. Tvrdosť ZK bola podstatne nižšia ako ZM, zatiaľ čo TOO dosahovala priemernú tvrdosť. Malý pokles tvrdosti v TOO bol spôsobený v dôsledku zhrubnutia zrna [28].



Wahba M. a Katayama S. z univerzity v Osake skúmali zvariteľnosť tvárnených horčíkových zliatin AZ31B a AZ91B, odlievanej zliatiny AZ91D a práškovou metalúrgiou vyrobené zliatiny AZ31B. Materiály boli zvárané 16 kW diskovým laserom s vlnovou dĺžkou 1,03 μm v kontinuálnom režime. Bola pozorovaná prítomnosť pórov (obr. 9) vo zvaroch v odlievaných materiáloch, čo bolo s najväčšou pravdepodobnosťou zapríčinené uviaznutými plynmi v materiáli počas odlievania. Taktiež bola pozorovaná extrémna pórovitosť po zváraní materiálov vyrábaných práškovou metalúrgiou (AZ31B). Obdobne ako v predošlom prípade, pórovitosť bola spôsobená v dôsledku prítomnosti plynov zachytených v základnom materiáli počas výrobného procesu [29].

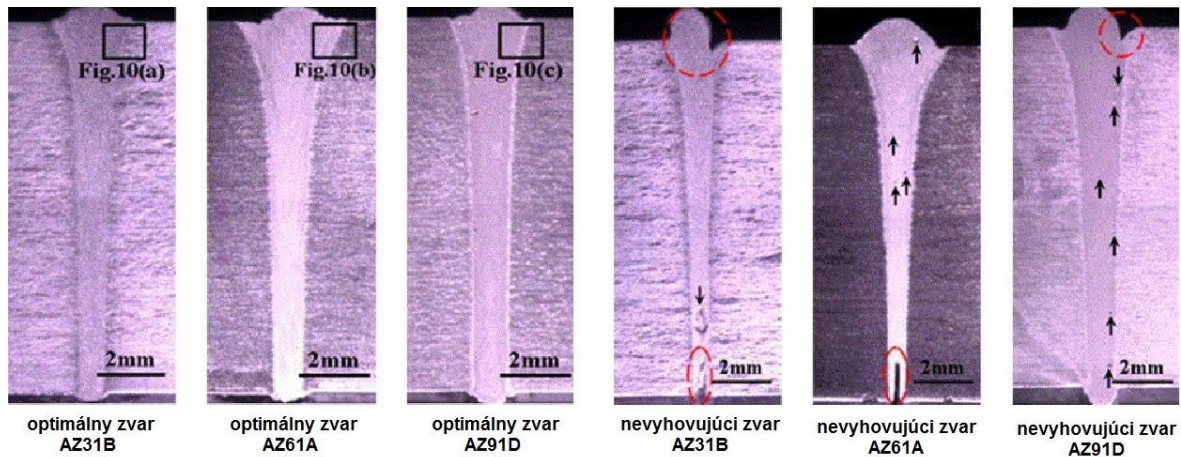


Obr. 9 Makroštruktúra zvarov odlievanej horčíkovej zliatiny AZ91D vyhotovených výkonom lúča a rýchlosťou zvárania: a) 4 kW a 4 m/min, b) 3 kW a 4 m/min, c) 2 kW a 6 m/min, d) 1 kW a 8 m/min [29]

Výrazné zníženie pórovitosti bolo dosiahnuté zváraním tvárnených zliatin. Taktiež je možné dosiahnuť nižšiu pórovitosť zváraním materiálov vyrábaných vysokotlakovým odlievaním [29].



Chao-Ting Chi a kolektív z univerzity v Taiwane skúmali v práci [30] vplyv parametrov zvarovania elektrónovým lúčom na zvariteľnosť horčikových zliatin AZ série. Pri zvaraní bol pozorovaný nárast pevnosti a tvrdosti so zvyšujúcim sa obsahom Al v Mg zliatine. Uvedený nárast tvrdosti súvisel so zvyšujúcou sa koncentráciou krehkých precipitátov (λ fáza, $Mg_{17}Al_{12}$) vo zvarovom kove (ZK). Pozorované chyby zvarových spojov (dutiny, zápaly, pretečený koreň, vid' obr. 10) môžu vytvárať miesta koncentrácie napätí a znižovať pevnosť a ťažnosť zvaruku. Hrúbky zvarovaných kovov boli 12 mm [30].



Obr. 10 Makroštruktúra vyhovujúcich a nevyhovujúcich zvarov vyhotovených elektrónovým lúčom [30]



Yu Z. H. a kolektív na „Hunan University“ v Číne skúmali vplyv zvyšujúceho sa objemu zinku v horčikových zliatinách (ZK21, ZK40, a ZK60) na mikroštruktúru a mechanické vlastnosti zvarových spojov zvarovaných CO_2 lúčom. Vzhľadom na nižší tepelný príkon laserového žiarenia, možno takto bez väčších problémov zvärať horčikové zliatiny s objemom zinku do 4 hm %, ktoré sú konvenčnými technológiami zvarovania iba obtiažne zvariteľné. Zliatina ZK60 je náchylná na kryštalizačné praskanie a vyznačuje sa horšou zvariteľnosťou, ktorá vyplýva z prítomnosti precipitátov $Mg_{51}Zn_{20}$ vylúčených po hraniciach zŕn v ZK. Zrná ZK zliatiny ZK40 sú najjemnejšie zo všetkých troch zliatin. Veľkosť zrna je cca 4,8 μm . Zvar má najvyššiu pevnosť 312 MPa (cca 90 % pevnosti ZM) [31].



V ďalšej práci sa Srinvasan P.B. a kolektív zo spoločnosti „GKSS-Forschungszentrum“ zaoberali zvarovaním horčikovej zliatiny AZ31 HP s Nd: YAG laserom za použitia prídavného materiálu AZ61 a bez prídavného materiálu s cieľom zhodnotiť odolnosť zvarov proti koróznemu praskaniu pod napätím. Vo zvare vyhotovenom s prídavným materiálom nastala iniciácia a šírenie trhliny v TOO [32].

3. Záver

Cieľom technológov je v čo najväčšej miere obmedziť vplyv technológie zvarovania na vznik defektov vo zvarovom spoji, vďaka čomu sa dosiahnu zvarové spoje požadovanej kvality. Dosiahnutie tohto cieľa umožňuje moderná zvaracia technika, ktorá spĺňa neustále sa zvyšujúce nároky. Medzi progresívne metódy zvarovania patrí zvarovanie laserovým a elektrónovým lúčom. Tieto metódy spájania materiálov spĺňajú podmienky, ako sú stabilita procesu, reprodukovateľnosť.

Je dôležité koncentrovať výskum na optimalizáciu, kontrolu, reguláciu a definovanie parametrov zvarovania pre rôzne horčíkové zliatiny. Výskumné práce týkajúce sa modelovania a simulácie tiež prispievajú k pochopeniu samotného procesu zvarovania.

Laserové zvarovanie sa stane dôležitým procesom metalurgického spájania horčíkových zliatin a bude môcť podporovať ich širšiu aplikáciu v kozmickom, leteckom, automobilovom priemysle, elektronike a ďalších odvetviach. Dva hlavné typy priemyselných laserov, a to CO₂ lasery a Nd:YAG lasery sa dosiaľ použili na výskum zvariteľnosti Mg zliatin. Zvarové spoje bez výskytu trhlín s nízkou pórovitosťou a požadovanou kvalitou možno vyhotoviť použitím vhodných parametrov procesu laserového zvarovania v prípade niektorých horčíkových zliatin, najmä tvárnených. Avšak horčíkové zliatiny môžu vykazovať kvôli ich základným vlastnostiam určité problémy pri ich spracovaní, ako sú defekty, nestabilný zvarový kúpeľ, veľký rozstrek, výrazný sklon k prevýšeniu spoja, zápaly, pórovitosť, likvačné a kryštalizačné praskanie, oxidické inklúzie a pokles obsahu legúr. Ako výhodnejšie sa javí použitie technológie zvarovania elektrónovým lúčom vzhľadom na existujúce vákuum, čím sa podstatne zníži pórovitosť a zamedzí oxidácii zvarového kovu. V budúcnosti bude stále potrebné vedecké skúmanie za účelom pochopenia a odstránenia niektorých základných problémov zvariteľnosti horčíkových zliatin.

Literatúra:

1. X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarrigeon, W. Wallace: *A review of laser welding techniques for magnesium alloys*. 2005
2. L.M. Zhao and Z.D. Zhang: *Effect of Zn alloy interlayer on interface microstructure and strength of diffusion-bonded Mg–Al joints*.
3. Alloy Development, Processing and Applications in Magnesium Lithium Alloys, © 2001[cit. 2012-21-09]. Dostupné na internete: <http://www.jim.or.jp/journal/e/42/07/1160.html>
4. Dostupné na internete: <http://www.chemicool.com/elements/titanium.html> 3.5.2012
5. Lima, M.S.F.: 2005. Laser beam welding of titanium nitride coated titanium using pulse-shaping. *Mater. Res.* 8, 323–328.
6. Ptaček, Luděk a kolektiv.: *Nauka o materialu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
7. Píšek, F. – Jeníček, L. – Ryš, P.: *Nauka o materiálu I. Nauka o kovech*. 3.svazek, Acaemia Praha, 1972
8. Hassdenteufel et al: *Elektrochemické materialy*. Alfa Bratislava, 1978
9. Dostupné na: <http://www.matdesign.sav.sk/data/files/239.pdf>
10. Dostupné na: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/03_Magnesium%20and%20magnesium%20alloys.pdf
11. Sujit Das: *Magnesium for Automotive Applications: Primary Production Cost Assessment*
12. K. U. Kainer: *Magnesium*. Weinheim: Wiley-WCH, 2004

13. Lehner C, Reinhart G (1999). Welding of die casted magnesium alloys for production machines. *J Laser Appl* 11(5): 206–10.
14. I. Hrivňák: *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*; Slovenská technická univerzita v Bratislave; Bratislava; 2008
15. Dostupné na: <http://www.magnesiumelektron.com/data/downloads/DS250JO.PDF>
16. Hrivňák, I. 2009. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. ISBN 978-80-227-3167-6
17. Dostupné na: <http://www.keytometals.com/Article35.htm>
18. Ionic bond. [cit. 2012-25-12]. Dostupne na internete: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=190232>
19. MORDIKE, B.L. EBERT, T. 2001. Magnesium Properties — applications — potential. *Materials Science and Engineering A302* 37–45
20. Dostupné na : <http://www.gcsescience.com/a7-ionic-bond-magnesium-oxide.htm>
21. E.E. Sprow, The laser-welding spectrum: what it has to offer you, *Tool. Prod.* 54 (3) (1988) 56–563.
22. SCHULTZ H. 1994. *Elektron beam welding*, ISBN 1855730502
23. MARÔNEK, M., BÁRTA, J. 2008. *Multimediálny sprievodca technológiou zvárania*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-066-7
24. SHAN, J. 2010. Laser welding of magnesium alloys, In *Welding and joining of magnesium alloys*, ISBN 978-0-85709-042-3
25. WEISHEIT, A. GALUN, R. MORDIKE, B. L. 1998. CO2 laser beam welding of magnesium-based alloys, In: *American Welding Society*, 149-154
26. LEHNER, C. REINHART, G. SCHALLER L. 1999. Welding of die-casted magnesium alloys for production, In: *Journal of Laser Applications Mnichov*,
27. ZHAO, H. DEER OY, T. 2001. Pore Formation during Laser Beam Welding of Die-Cast Magnesium Alloy AM60B — Mechanism and Remedy, *In Pennsylvania State University*, s. 204-210
28. LEONG, K. H. KORNECKI, G. SANDERS, P. G. KRSKO, J. S. Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy. [cit. 2013-07-01]. Dostupné na internete: <http://www.ne.anl.gov/facilities/lal/Publications/laser%20welding/laser%20weld-Mg.pdf>
29. WAHBA M. a KATAYAMA S. 2012. Laser Welding of Magnesium Alloys, In *Transactions of JWRI*, 1. vydanie, s. 11-32
30. Chao-Ting Chi. Chuen-Guang Chao. Tzeng-Feng Liu. Che-Chung Wang. 2006. A study of weldability and fracture modes in electron beam weldments of AZ series magnesium alloys, In: *Materials science and engineering: A*, s. 672 – 680
31. YU, Z. H. YAN, H. G. CHEN, J. H. WU Y. Z. 2010. Effect of Zn Content on the Microstructures and Mechanical Properties of Laser Beam-Welded ZK Series Magnesium Alloys. In *Journal of Material Science* 47-48 ISSN: 1573-4803
32. SRINIVASAN, P. B. RIEKEHR, S. BLAWERT, C. DIETZEL, W. KOÇAK, M. 2011. Mechanical Properties and Stress Corrosion Cracking Behaviour of AZ31 Magnesium Alloy Laser Weldments, In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, s. 1–8

Pod'akovanie:

Príspevok je súčasťou riešenia projektu VEGA 1/2594/12.