

BUZA GÁBOR – ERŐS ANDREA – FAZAKAS ÉVA

A hegesztési munkagáz összetételének hatása a plazmaképződésre a lézersugaras hegesztés során*

A hagyományos hegesztési technológiákkal összehasonlítva, a lézersugaras hegesztés során a munkagázoknak (védőgázoknak) sajátos szerepe van, különösen a 10^6 W/cm²-nél nagyobb lézersugár teljesítménysűrűség esetén. A munkagáz atomjainak (esetenként molekuláinak) csak az elektronjai lépnek a lézersugár fotonjaival kölcsönhatásba, ami a képződő plazma elektronsűrűségét és ezen keresztül a plazma optikai tulajdonságait befolyásolja. Mindezek meghatározó szerepet játszanak a hegesztési varrat geometriájára, különösen a hegesztési varrat mélységére, valamint a hegesztési sebességre stb. A bemutatott kísérletsorozat és vizsgálati eredmények a feltárt összefüggések megvilágítását célozza.

1. Bevezetés

A klasszikusnak számító kötési technológiák körében – különösen az autópárházban – terjednek a lézersugaras hegesztő eljárások, mert jól automatizálhatók, kifejezetten alkalmasak tömegtermelésre, a hegesztés eredménye reprodukálható, esetenként olcsók. Mivel az ívhegesztés során a védőgáz jelentősen befolyásolja az ívszerkezetet, az anyagátmenetet, a beolvadás mélységét, a varrat alakját és a varrat kémiai összetételét, a gazdaságossági és minőségi szempontok fontos szerepet játszanak a legkedvezőbb védőgáz kiválasztásában. Feltételezhető, hogy a lézersugaras

hegesztés esetén is hasonló a helyzet.

A NASA az 1970-es évek közepén egy kiterjedt kísérletsorozat keretében összehasonlította az elektronsugaras, a lézersugaras és az ívhegesztés eredményeit, különböző paraméterek függvényében [1]. Akkor csak He és Ar védőgázt használtak. Az akkori körülmények és technikai lehetőségek körében az elektronsugaras hegesztést találták a legeredményesebbnek. Lehet, hogy Európához képest az USA-ban ezért is volt sokáig kedveltebb az elektronsugaras hegesztési technológia, mint a lézersugaras?

A későbbi kutatások és irodalmi

közlések szerint jobb felületi minőség érhető el az olvadt zónában, ha kisebb a gázok zavaró mechanikai hatása. Megállapították, hogy a mélyvarratos hegesztésnél a nagy ionizációs potenciálú He jelentős szerepet tölt be a CO₂ lézersugárral való hegesztésénél, mert kedvezően befolyásolja a lézer-anyag kölcsönhatást [2–4].

Gao és társai igazolták, hogy védőgáz jelenlétében nagyobb a lézersugár anyagba hatolási mélysége, amit a plazma hatásával magyaráztak. Szerintük a plazma a fémgőz ionizációjával alakul ki, amikor a hőmérséklet nagyobb, mint 20 000 °C [5].

Keskitalo és kutatócsoportja az argon és a nitrogén védőgáz hatását vizsgálták rozsdamentes acélok hegesztésénél. A két gáz hatása között egy fontos különbség figyelhető meg: a nitrogén kis mértékben be tud oldódni az ausztenitbe és az intersticiós helyzetben lévő nitrogénatomok növelik a hegesztési varrat keménységét. A nitrogénatomok beépülése az ausztenites acélokba előnyös is lehet, mert kompenzálja a hegesztési varrat átlagosnál kisebb szilárdságát. A vizsgálatban duplex acélokat he-

Dr. Buza Gábor okl. kohómérnök (miskolci Nehézipari Műszaki Egyetem, 1975). 1986-tól egyetemi doktor, 1990 óta a műszaki tudomány kandidátusa. 2008-tól a Miskolci Egyetem c. egyetemi tanára, 2013-tól főiskolai tanár (Edutus főiskola). 1975-től 1988-ig a Vaskut, 1988-tól a BME dolgozója. Jelenleg a BME Gép-járművek és Járműgyártási Tanszék nyugalmazott docense és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. kutatója. Fő érdeklődési területe: acélok fázisátalakulásának vizsgálata, nagy energiasűrűségű eljárások. Több mint 10 éve intenzíven foglalkozik a nagy teljesítményű lézerek anyagmegmunkálási lehetőségeinek kutatásával.

Erős Andrea (BSc – 2010 könnyűipari mérnök, termékkonstrukció szakirány; minőségirányítási rendszerfejlesztő). Több mint 5 éve dolgozik a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nél (BZN) anyagtudományi területen.

Dr. Fazakas Éva (BSc – 2000 vegyész-fizikus, MSc – 2002 anyagtudomány és technológia Babes–Bolyai Tudományegyetem, PhD – 2011 anyagtudomány és szilárdtestfizika, ELTE) több mint 10 éves tapasztalattal rendelkezik anyagtudományi fejlesztések, ezen belül az újszerű Al-alapú ötvözetek és nagyentrópiájú ötvözetek előállítása és tanulmányozása terén. 2013-tól vezetőként dolgozik a BZN Kft.-nél.

*A cikk megjelent a Gépgyártás, LV. évfolyam, 2015. 1. számában

gesztettek argon és nitrogén védőgáz atmoszférában. A hegesztések 4 kW-os diszklézerrel történtek [6].

Az ezredforduló idején kezdett elterjedni a lézer-hibrid hegesztés, ahol a gáz összetételének az ív- és a lézersugaras hegesztés jellegzetességeinek egyaránt meg kell felelni. *Fellman* például a védőgáz összetételének hatását vizsgálta a varrat mechanikai tulajdonságaira [7].

Kiterjedt vizsgálódás után is megállapíthatjuk, hogy a szakirodalom nem közöl olyan ismereteket, melyek összetartozó technológiai és mérési adatok komplett egységét tartalmazzák, ezért azok csak nagyon korlátozottan alkalmasak általános érvényű, korrekt összefüggések és következtetések levonására. A szakirodalmi közlések többnyire a kísérleti eredmények szűk körére vonatkoznak.

Ezért célul tűztük ki a munkagáz szerepének és hatásának átfogó vizsgálatát a mélyvarratos lézersugaras hegesztésre, különös tekintettel a plazmaképződésre és a hegesztési varrat geometriájára.

2. Kísérleti-kutatási-tervezési munka

Kísérleteinket a CO₂ lézersugár (10 600 nm) hatásának vizsgálatára terveztük. A sugárforrás egy 4,5 kW max. fénytelsítményű, Rofin gyártmányú, Slab típusú ($k \geq 0,95$) volt, melynek típusjele DC 045. A sugárvezetés 45°-os sík saroktükrökből és egy 200 mm fókusztávolságú vörösréz parabolatükrökből állt. A lézersugár cirkulár-polarizált volt. A hegesztési kísérletek anyaga ZF7B jelű acél volt, ami egy módosított 20MnCr5 jelű, gyengén ötvözött betétedzésű acélminőségnek felel meg (C%: 0,15–0,20; Mn%: 1,10–1,40; Cr%: 1,00–1,30; B%: 0,001–0,003; Al%: 0,02–0,05; N%: min. 0,009).

A hegesztési munkagázokat a Messer Hungarogáz Kft. palackozva szállította. A gázkeverékeket min. N4.0 tisztaságú elemi gázokból, tömegmérés alapján állították össze. A vizsgálatok során alkalmazott munkagázok összetételét az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A hegesztési munkagázok térfogatárama minden kísérlet esetén 16 l/perc volt, amit 6 mm belső átmérőjű csövön keresztül, a munkadarab fölső

1. táblázat. A kísérletsorozat hegesztési munkagázainak összetétele térfogat %-ban

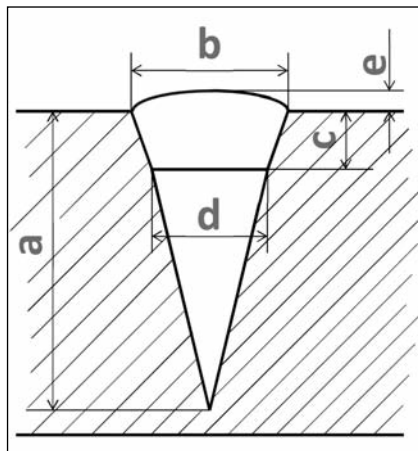
	CO ₂	Ar	He	H ₂
1	100			
2		100		
3		80	20	
4		60	40	
5		40	60	
6		20	80	
7			100	
8		76	19	5

síkjával 45°-ot bezáró szög alatt, a lézersugár haladási irányával ellentétes irányban fújtunk.

A hegesztési kísérletek során – a hegesztési munkagázokon túl – a lézersugár teljesítményét (P: 2600–3400 W, $\Delta = 200$ W), a mélyvarratos hegesztési sebességet (v: 2100–6300 mm/perc, $\Delta = 300$ mm/perc) és a fókuszfolt helyzetét f : +2,6–0 mm, $\Delta = 1,3$ mm) változtattuk. Összesen 247 hegesztési kísérletet hajtottunk végre.

Minden mélyvarratos hegesztést megelőzőtt egy ún. tűzővarrat, melynek paramétereit a kísérletek során nem változtattuk. Lézersugár teljesítménye: 1200 W, hegesztési sebesség: 3200 mm/perc, fókuszhelyzet: +2,6 mm, munkagáz: mint a tűzővarratot követő mélyvarrat esetén.

A hegesztés során száloptikai pirómeterrel mértük a hegesztés helyéről érkező elektromágneses sugárzás intenzitását a 800-1000 nm hullámhosszúságú tartományban. A hegesztési varrat belső hibáit (porozi-



1. ábra. A varrat keresztmetszeti síkjában mért adatok. a: Varrat mélysége; b: Korona szélessége; c: Korona magassága; d: Gyök szélessége; e: Kidudorodás (beszívódás)

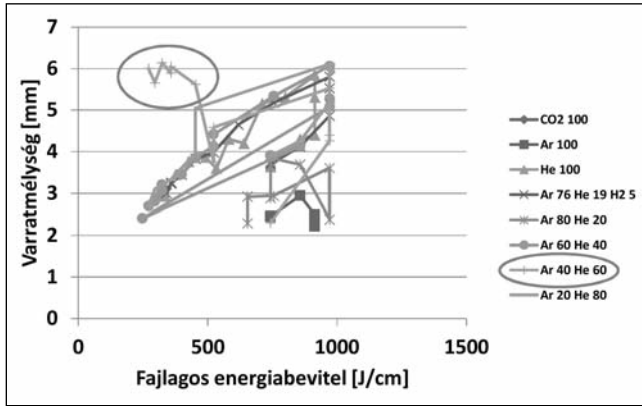
tás, repedés stb.) USIP 11 típusú, impulzusos ultrahang vizsgáló műszerrel ellenőriztük. A csatoló közeg víz volt (víz alatti ultrahangos vizsgálat). Metszeti metallográfiai vizsgálatához a mintadarabot a varrat kezdete és vége között, félútról munkáltuk ki (a hegesztési varrat hosszúsága ~350 mm). A varrat anyagának mikroszkópi vizsgálatához a metallográfiai csiszolatot 7%-os Nital marószerezrel maratuk, majd az 1. ábrán látható adatokat határoztuk meg a Weding Expert berendezés segítségével.

3. Eredmények

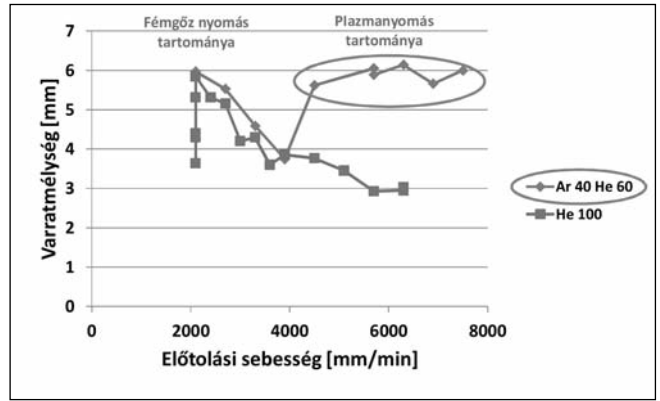
A mélyvarratos lézersugaras hegesztés eredményének talán legjellemzőbb adata a hegesztési mélység. A hegesztési mélységet számos technológiai adat befolyásolja, melyek közül a mélyvarratos hegesztés jellegzetessége miatt (~10⁶ W/cm² teljesítménysűrűség küszöbérték) a lézersugár teljesítményét szokás kiemelni. Ennél több információt szolgáltat az egységnyi hosszúságú hegesztési varratra jutó lézersugár energia (J/cm). Ebben az összevetésben általános tapasztalat, hogy a lézersugár teljesítményének, ill. fajlagos energia igényének növekedésével a varratmélység is nő. Ez a tendencia a mi kísérleti eredményeink alapján is megerősíthető. Egy kivétellel, valamennyi hegesztési munkagáz esetén ezt az általánosan ismert tendenciát figyeltük meg. A 40% Ar + 60% He gázkeverék esetén azonban a többi mérési adattól elkülönülő eredményeket mértünk. Ezt mutatja a 2. ábrán látható diagram, ami a hegesztési mélységet a fajlagos hegesztési energia függvényében ábrázolja.

A 2. ábra információi azért is meglepőek, mert általános vélekedés szerint a 100% He munkagáz alkalmazása lenne a legkedvezőbb hatású. (Meg kell jegyezni, hogy a lézersugaras hegesztés esetében sem a hegesztési mélység az egyetlen paraméter, ami alapján a hegesztés eredményét minősítjük, vagyis a héliumra vonatkozó állítás a 2. ábrától függetlenül igaz maradhat.)

Mivel a lézersugaras hegesztés esetén a héliumot tartják az egyik legkedvezőbb hatású gáznak (sajnos az összes többihez képest a legdrá-



■ 2. ábra. A lézersugaras hegesztési munkagáz és a hegesztési varrat egységnyi hosszúságára jutó lézersugár energia hatása a varrat mélységére



■ 3. ábra. A hegesztési (előtolási) sebesség hatása a lézersugaras hegesztési varrat mélységére a He és egy Ar+He gázkeverék esetén

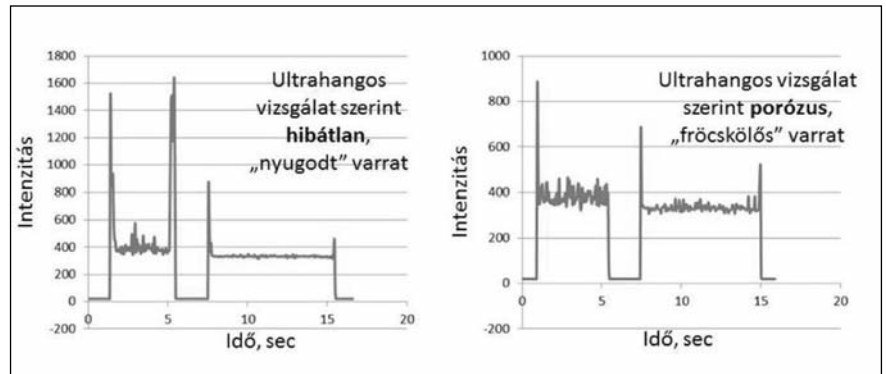
gább), ezért a mérési eredményhalmazból ragadjuk most azokat ki, melyek a 100% He és a 40% Ar + 60% He hatásának összehasonlítására alkalmasak. A hegesztő technológusokat az elérhető hegesztési sebesség is érdekli, ezért most ennek függvényében vizsgáljuk a varrat mélységét (3. ábra). A 40% Ar + 60% He gázkeverék hatása ebben az összehasonlításban is szembevetendő.

A hegesztési varrat belső hibáiról az ultrahangos vizsgálat eredményei adnak tájékoztatást. Mivel esetünkben analóg kijelzésű vizsgáló eszközről (USIP 11) van szó, az értékelés jellemzően szöveges természetű. A varrattól, a hegesztés során regisztrált elektromágneses sugárzás intenzitás adatok azonban numerikusak. Egyértelmű megfigyelés volt, hogy az ultrahangos vizsgálat szerint hibátlan varrat hegesztése során a sugárzás intenzitásában kicsi volt a szórás. A 4. ábrán két varrat hegesztése során rögzített mérési adatok láthatók. Mind a két esetben jól elkülöníthető a tűző- és a mélyvarrat. A varratok kezdete és vége a regisztrált sugárzás intenzitásában többnyire nagy, sztochasztikus transziens jelenségeket mutat. Ezeket az intenzitás csúcsokat az értékelés során nem vettük figyelembe. Az első tartomány a tűzővarrathoz tartozik, ennek időtartama mindig azonos. A második tartomány a mélyvarrathoz, ezért ennek időtartama a hegesztési sebességnek lineáris függvénye. Értékeléseinket a második tartomány transziensektől mentes intenzitásváltozásának szórására korlátoztuk. Ez alapján tudunk „nyugodt” és „fröcskölős” varratokat meg-

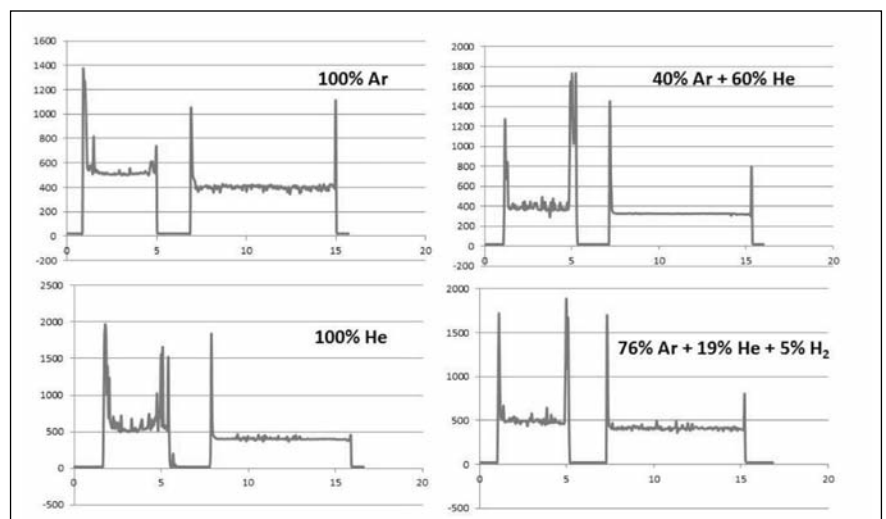
különböztetni. A megfigyeléshez hangeffektusok is tartoznak, vagyis a későbbiekben a vizsgálatokat érdemes lesz akusztikus mérésekkel is kiegészíteni.

Az 5. ábrán négy hegesztés során rögzített adatok láthatók. A négy diagram felvételi körülményei között csak

az alkalmazott hegesztési munkagáz volt a különbség (pl.: mélyvarrat $P = 2600 \text{ W}$, $v = 2100 \text{ mm/min}$). A négy varrat közül a 40% Ar + 60% He gázkeverékkel készült bizonyult a legnyugodtabbnak (egyben legcsendesebbnek) és a 100% He csak a második helyezett lehetett.



■ 4. ábra. Példák a lézersugaras hegesztés során a varrattól érkező sugárzásintenzitás változására



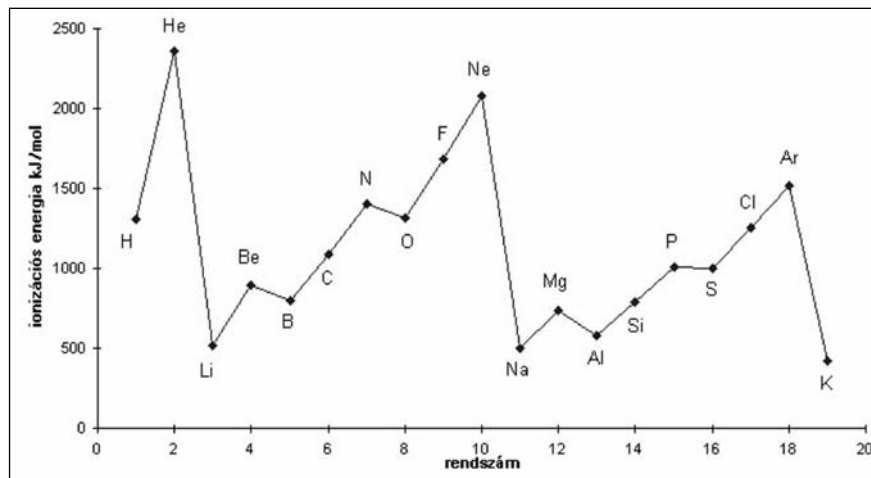
■ 5. ábra. Négy hegesztési munkagáz hatása a varrattól érkező sugárzás intenzitására ($P = 2600 \text{ W}$, $v = 2100 \text{ mm/min}$)

4. Értékelés és következtetések

A tapasztalt jelenségek és a mérési adatok értékelése érdekében a lézersugaras hegesztés során lejátszódó folyamatok áttekintéséből kell kiindulnunk. Tudjuk, hogy a lézersugaras hegesztéseknek két csoportja van: a hővezetési és a mélyvarratos. A kettő közötti átmenetet a $\sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ teljesítménysűrűség-értékkel szokás jellemezni, amely érték az anyagminőségtől és a lézersugár keresztmetszeti intenzitáseloszlásától függ. A határ alatt a hővezetési hegesztés viszonyai jellemzőek, föltötte a mélyvarratos. A hővezetési hegesztés esetében a hőtranszport folyamatok hasonlóak a hagyományos hegesztési folyamatok során lejátszódóakhoz: az olvasztáshoz szükséges energia az olvadék felszínétől a varrat aljáig hővezetéssel és az olvadék áramlásával jut.

A mélyvarratos hegesztés során a nagy teljesítménysűrűség következtében a megolvadt fém már olyan intenzíven párolog, hogy az olvadéktócsa felszínét deformálja, rajta horpadás keletkezik. Ezzel megnő a lézersugár fotonjainak anyagba hatolásához (fémek esetén 1...10 nm mély) rendelkezésre álló felület nagysága, vagyis az abszorpció mértéke is nő. Így egy öngerjesztő folyamat indul be, aminek varratmélységre gyakorolt hatását a lézersugár teljesítménye, ill. teljesítménysűrűsége korlátozza. A fémgőzzel telített csatorna (keyhole) és a fémolvadék fázishatárán a lézersugár egy része abszorbeálódik az olvadékban, a másik – geometriai okokból – lefelé tükröződik. A mélyvarratos hegesztés során tehát az energia számottevő része szinte időigény nélkül (fénysebességgel) jut a varrat aljára. A csatornában azonban nemcsak az elpárolgott hegesztendő anyag gőze, hanem plazma is van.

A lézersugár fotonjai az elektronokkal lépnek kölcsönhatásba, a fotonok kvantált energiacsomagjainak hatására lépésről lépésre nő az elektronok energiája. Ezen az úton könnyedén tehetnek szert akkora egyedi energiára, hogy legyőzik az atommag kötés erejét, vagyis az anyag ionizálódik, plazmaállapotba kerül. A mélyvarratos hegesztés esetében ezért nem fémgőz, hanem fémgőz-plazma csatorná-



6. ábra. Az első ionizációs energia rendszám függése

ról beszélnek. Milyen rendszámú atomokból áll a plazma? A fotonok, melyek a CO_2 lézersugár esetében az atmoszférikus nyomású levegőben haladnak, a fókuszálás következtében, a hegesztési varrat környezetében olyan gyakorisággal „ütköznek” elektronokkal, hogy már a hegesztési munkagáz nemesgáz atomjait is ionizálják. A plazma ezért fém és nemesgáz ionokat egyaránt tartalmaz. A különböző rendszámú ionok között nagy energiájú elektronok vannak, melyek táguló teret alkotnak. A plazmának tehát van nyomása, ami első közelítésben az elektronsűrűségtől és az elektronok energiájától (kinetikus energia, elektronhőmérséklet) függ.

Milyen mély lehet a gőz-plazma csatorna? Csak annyira lehet mély, hogy a csatorna alján lévő gőz-plazma nyomás megtartsa a fémolvadék nyomását. Acél esetében ez

$$\rho_{olvadék} = h \cdot \gamma \cdot g, \quad [1]$$

behelyettesítve (kb.)

$$\rho_{olvadék} \approx 1 \text{ mm} \cdot 7,2 \cdot \frac{10^{-6} \text{ kg}}{\text{mm}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx$$

$$\approx 0,07 \text{ mPa},$$

vagyis minden mm csatornamélység (ami általában alig kevesebb, mint a varratmélység) 0,07 mPa gőz-plazma nyomást igényel a csatorna alján.

A gőz és a plazma nyomás pontos arányát nem ismerjük. Ez nem is lehet egy állandó érték, mert erősen függ a munkagáz kémiai összetételétől, a lézersugár teljesítményétől, a fókuszolt méretétől és helyzetétől stb.

Vizsgálódásunkat korlátozzuk két munkagáz komponensre, a héliumra és az argonra. Amíg a hélium teljes ionizációja esetén (minden elektron elhagyja az atommag körüli pályáját) atomonként csak két szabad elektron keletkezhet, addig az argon esetében 18. Az első ionizációs energia rendszám függését a 6. ábra mutatja. Ebből az látszik, hogy az argon első ionizációs szintjéhez kevesebb energiára van szükség, mint a hélium esetében. A hélium két ionizációs szintjéhez 2372,3 kJ/mol, ill. 5250,5 kJ/mol energiára van szükség. Az argon első három ionizációs energiaszintjét 1520,6 kJ/mol, 2665,8 kJ/mol és 3931 kJ/mol értékekkel jellemezhetjük. Ezekből az értékekből arra a következtetésre juthatunk, hogy közel azonos energiabefektetéssel a hélium esetében csak két, az argon esetében viszont három szabad elektront hozhatunk létre. Amennyiben a fotonok kellően nagy mennyiségben állnak rendelkezésre, a héliumtól több elektron már nem származhat, de az argontól igen.

Amennyiben elfogadjuk, hogy a plazma szabad elektronjainak sűrűsége (száma egységnyi térfogatban) a plazma nyomás növekedését eredményezi, akkor az argon egyértelműen kedvezőbb munkagáz a héliumnál, a varrat mélysége szempontjából.

A gőz-plazma csatorna szabad végénél (torok) a kiáramló fémgőz és plazma keverékéből álló „felhő” van. A lézersugárnak először ezen a felhőn kell áthaladnia, hogy a gőz-plazma csatornába juthasson, hogy ott a fém-

olvadékot hevítse. A fotonok tehát először a „felhő” anyagával kerülnek kölcsönhatásba. A felhő alapvető optikai tulajdonságai (abszorpció, reflexió, transzmisszió) az összetételétől, hőmérsékletétől és nyomásától függenek. Tudjuk, hogy az elektronsűrűség és a hőmérséklet növekedésével a reflexió mértéke nő. Ennek eredményét árnyékolóhatásként szokás jellemezni. A hegesztés során ezt úgy tapasztaljuk, hogy azonos körülmények között, a lézersugár teljesítményének növekedése a varratmélység csökkenését eredményezi. Ez azért van, mert a túlhevített „felhő” a lézersugár nagyobb részét reflektálja, nem engedi a gőz-plazma csatornába jutni. A reflexió hatás növekedése a lézersugár hullámhosszúságával négyzetesen növekszik. Ezért ez a hatás, az ipari lézerek közül legerősebben a CO₂ lézersugár esetén tapasztalható.

Kísérleti eredményeink azt igazolták, hogy a hegesztési varratmélység szempontjából ideális gőz-plazma állapot a megfelelő összetételű munka-

gáz keverékkel még a CO₂ lézersugaras hegesztés esetén is biztosítható.

Irodalom

- [1] *Conrad M. Banas*: NASA Contractor Report, NASA CR-132386, Electron Beam, Laser Beam And Plasma Arc, Welding Studies 1974
- [2] *A-H. I. Mourada, A. Khourshidb, T. Sharefb*: Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties, *Materials Science and Engineering A* 549 (2012) 105–113.
- [3] *Sana Bannour, Kamel Abderrazak, Hatem Mhiri, Georges Le Palec*: Effects of temperature dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy, *Optics & Laser Technology* 44 (2012) 2459–2468.
- [4] *P. Sathiya, Mahendra Kumar Mishra, R. Soundararajan, B.*

Shanmugarajan: Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel, *Optics & Laser Technology* 45 (2013) 46–55.

- [5] *Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Qianwu Hu*: Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding, *Journal of Materials Processing Technology* 184 (2007) 177–183.
- [6] *M. Keskitalo, K. Mäntyjärvi, J. Sundqvist, I. Eriksson, A. F. H. Kaplan*: The influence of shielding gas on the properties of laser welded stainless steel, *NOLAMP* 14, Gothenburg, August 26–28., 2013
- [7] *Anna Fellman*: The effect of shielding gas composition on welding performance and weld properties in hybrid CO₂ laser–gas metal arc welding of carbon manganese steel; *Journal of Laser Applications*, February 2006, VOLUME 18, NUMBER 1, 12–20.

CSANÁDYNÉ BODOKY ÁGNES ÉS TÁRSAI*

Ganz Ábrahám vasúti kerekeinek titkai anyagtudományi vizsgálatok tükrében**

A közleményben Ganz Ábrahám öntödéjében 1867-ben készített, sok éven át futott kéregöntésű, kettősfalú vasúti kerék anyagát tanulmányoztuk korszerű anyagtudományi módszerekkel (OES, OM, SEM, TEM, EDS, EBSD, XRD, XRF [ESCA], SNMS, mikrokeménység-mérés) és a kapott eredményeket elemeztük. Az OES vizsgálatok kimutatták, hogy a kerékben mindenütt megtalálható ~0,059% antimon (Sb), ami többszöröse az öntvényekbe az egyéb anyagokkal bejutó átlagos mennyiségnek (<0,01%). Az Sb SNMS technikával a több mm-es kéregben is megtalálható volt, kivéve a kéreg felszínének legkülső, 1 µm-nél kisebb rétegét. A 20. századi sokoldalú vizsgálatok szerint a kerékben kimutatott antimon mennyisége ideális, stabilizálja a perlitet, kedvezően hat az öntöttvas

mechanikai tulajdonságaira és így használhatóságára. A felület szerkezetének vizsgálatával (XRD, TEM, ED) bizonyítottuk, hogy a kéreg felszínén észlelt kiugró keménység (~600 HV) a nagymértékű képlékeny deformációval járó használat (sín-kerék érintkezés) következtében a perlitből kialakuló „nanokompozit” következménye, aminek kialakulását az öntvény anyagában kimutatott nagy széntartalom (4,09%) is elősegítette. A használat során egyre finomodó szerkezet is hozzájárult a kerekek hosszú élettartamához.

Ganz Ábrahám vasúti kerekei sikerének titka az ismert újszerű konstrukción és az azzal összefüggő előállítási technológián (kéregöntés) kívül a fém jelenleg ismertett összetételében és az ezekből kialakuló szerkezetében is rejlik.

* Csanády Andrásné, MTA doktora; Gábor János, gépészmérnök (Ganz Holding Zrt.); Jenei Péter, PhD és Prof. Gubicza Jenő, MTA doktora, (ELTE, Anyagfizikai Tanszék); Prof. Szabó Péter János, MTA doktora és Fábrián Réka, PhD (BME, Anyagtudomány és Technológia Tanszék); Radnóczi György, MTA doktora, tud. tanácsadó és Tóth Attila Lajos, PhD, CSc (MTA Energiakutató Központ, MFA); Langer Gábor, PhD, CSc (Debreceni Egyetem, Szilárdtest Fizikai Tanszék); Krafcsik Olga, PhD (BME, Fizika Tanszék); Prof. Verő Balázs, MTA doktora (Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.)

** Csanády Ágnes előadása a Ganz-év alkalmából hangzott el az Öntödei Múzeumban, az OMBKE Öntésztörténeti és múzeumi szakcsoport ülésén, 2015. május 13-án