



A kézi lézeres hegesztés paramétereinek vizsgálata

Investigation of the Handheld Laser Welding Parameters

Nagy Balázs Ákos,¹ Kovács Kíra,² Kovács Tünde Anna³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, kira.kovacs3@gmail.com

³ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

High-performance handheld laser welding technologies have undergone significant advancements in recent years, particularly with the emergence of compact, cooled, and precise beam-shaping equipment. Handheld lasers (HL) possess all the advantages of their industrially applied, machine- or robotic-arm-guided counterparts. The key distinction lies in numerical beam control, which, alongside the parameters critical for successful welding, receives particular attention. This was due to the material- and penetration-depth-dependent program code table of the user-friendly Lightweld 1500 XT fiber laser welding equipment. During the experiments, S355 structural steel and DC01 cold-rolled steel sheets were welded in a T-joint configuration with varying sheet thicknesses, using identical material pairings. The used filler material was a Böhler EMK 8 Ø1 mm solid wire electrode, and the shielding gas was nitrogen with a 4.6. purity. We found that even with the settings recommended by the welding machine manufacturer, there were welding deviations, which suggests that the quality of manual welding also depends on the skill of the welder.

Keywords: handheld laser welding, conduction laser welding, welding speed, filler material, nitride precipitations.

Összefoglalás

A nagy teljesítményű kézi lézeres hegesztési technológiák az utóbbi években jelentős fejlődésen mentek keresztül, különösen a kompakt méretű és hűtésű, precíz sugárformáló berendezések megjelenésével. A kézi lézerek (Handheld Laser – HL) minden előnnyel rendelkeznek, mint az iparban alkalmazott géppel vagy robotkarral sugárvezérelt társaik. Ez a numerikus úton történő sugárirányítás a lényegi különbség köztük, a sikeres hegesztés paramétereit mellett különös figyelmet szentelünk neki. Oka a felhasználóbarátta alkotott Lightweld 1500 XT típusú szálas lézeres hegesztőberendezés alapszáma és beolvasási mélység függvényében alkotott programkódtáblázata. A kísérletek folyamán S355 szerkezeti acél és DC01 hidegen hengerelt lemezeket hegesztettünk T elrendezésben különböző lemezvastagságokban, azonos anyagpárosításban. Az alkalmazott hozaganyag Böhler EMK 8 Ø1 mm tömör huzalelektroda, a védőgáz 4.6 tisztaságú nitrogén volt. Megállapítottuk, hogy a hegesztőgép ajánlásai szerinti beállítások mellett is találhatók voltak hegesztési eltérések, ami arra utal, hogy a kézi hegesztés minősége a hegesztő gyakoriságától is függ.

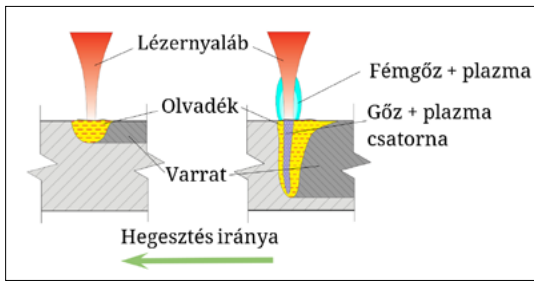
Kulcsszavak: kézi lézeres hegesztés, hővezetési lézeres hegesztés, hegesztési sebesség, hozaganyag, nitridkiválások.

1. Bevezetés

Az **1. ábrán** a lézerhegesztés során jellemzően létrejövő varratalakokat látni.

A lézeres technikák elengedhetetlenek minden napjainkban, főleg az ipari tevékenységek során.

Ez igaz a hegesztéstechnológiában is: precizitásuk, nagy teljesítménysűrűségük és ezzel szembeni kis alapszáma-hőterhelésük miatt **[1, 2, 3]**. Eddig jellemzően robosztus berendezéseket alkalmaztak, ami utal a gerjesztőkörre és az elkerített



1. ábra. Különböztetés a hővezetési (bal) és mélyvarratos (jobb) lézeres hegesztés között

munkatérre. A fiber (szál) technológia fejlődésének köszönhetően a gerjesztőköröket képesek vagyunk ipari huzalelektrodás (kód: 13) vagy volfrámelektrodás (kód: 14), védőgázos ívhegesztés gépeinek méretére alkotni [4]. Így jöttek létre a mostanság nagy figyelmet élvező kézi lézerforrások a 2000-es évek végén (General Electronics Co. szabadalma szerint) [4, 5]. Ezek az 1. generációs lézerforrások még nem rendelkeztek kis, az előbb említett méretekkel, de napjainkban a 4. generációs darabok a hűtőrendszerek fejlődésével képesek rá [4, 6].

A Hegesztés és rokon eljárások (MSZ ISO 4063:2023) nevű szabvány a különböző eljárásokhoz azonosítókat rendel, megkülönböztetve azonos elven működő technológiák kézi és gépi változatát. A kézi lézeres hegesztésnek nincs külön jelölése, az 521-es kóddal definiálható, ami: nagy energiasűrűségű (5), lézeres (2), azon belül szilárdtest (1) kivitt jelöl [7]. Amit még biztosan fixálhatunk ezzel az eljárással kapcsolatban: a fibertechnológia jellemző lézermédia a Nd:YAG kristályból készül ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ /YAG: ittrium-alumínium-gránát Nd^{3+} -ionokkal szennyezve), jellemző kisugárzásának hullámhossza 1064 nm (Near InfraRed – NIR) [1, 2, 8], ezen felül folyamatos üzemmódban (Continuous Wave – CW) működtetjük, illetve a hegesztési sebesség változása miatt csak hővezetési technikára képesek kézi sugárvezetés folyamán.

A cikk végén megvizsgáltuk az Inter technika Kft. jóvoltából használt IPG Lightweld 1500 XT lézeres berendezés alapprogramjainak minőségét.

2. Lézeres hegesztés paraméterei

Ahhoz, hogy képesek legyünk minőségi kötést alkotni, elengedhetetlen a bemenő paraméterek meghatározása, közben tartása [3]. A kötésgeometria és az ahhoz szükséges anyagvastagság meghatározásával kell kezdeni, ezektől függ a többi beállítható paraméter [9]. Amit képesek va-

gyunk biztosítani: a berendezésen a teljesítményt (esetleg sugárlehetőség), a védőgáz reduktorán a gáz áramlási sebességét és a munkadarabok egymáshoz viszonyított elhelyezkedését külön eszközökkel (szorítók, rögzítők, hegesztőasztal-sablon rendszerek) vagy hegesztési pontozással [3, 9]. Fejtörést fog okozni ezzel az eljárással a hegesztés sebességének konstans értéken való tartása és a fókusz pozíciója, távolsága [6].

2.1. Lézerteljesítmény

A lézer kimeneti teljesítménye (W, kW) meghatározza az alapanyaggal közölt energiát, ami befolyásolja a beolvadási mélységet [2].

A teljesítményigényt becsülni szokták, mivel sok tényezőtől függ. Az egyszerűsített megközelítés az energiasűrűséget veszi alapul [10]:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{4 \cdot P}{d_{\text{spot}}^2 \cdot \pi} \quad (1)$$

ahol:

I : energiasűrűség (W/cm^2),

P : lézerteljesítmény (W),

A : bevilágított felület (cm^2),

d_{spot} : foltátmérő (cm).

Megközelítéshez alkalmazható, hiszen ismerjük a hővezetési technika energiasűrűség-tartományát (10^4 – $10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$), viszont meg kell említeni, hogy sok tényezőt elhanyagol a képlet. A következő képlet az elnyelt energia (Q_a ; J) szerint közelíti meg [1]:

$$Q_a = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_l = m_a \cdot c_p \cdot \Delta T_m + m_a \cdot L_m + m_a \cdot c_p \cdot \Delta T_V + m_a \cdot L_V + Q_l \quad (2)$$

ahol:

Q_1 : az alapanyag olvadáspontig történő hevítésére szükséges energia,

Q_2 : a megolvadás energiája, amelyhez a látens hő szükséges,

Q_3 : az olvadék elpárologtatásához szükséges energia,

Q_4 : az elpárologtatás energiaigénye a párologtató látens hő függvényében,

Q_l : hővezetés, konvekció, párolgás, reflexió és sugárzás által elvesztett energia,

m_a : megolvasztott tömeg (kg),

c_p : fajhő ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$),

ΔT_m : az alapanyag olvadásához szükséges hőmérséklet-különbség (K),

L_m : olvadási látens hő (J/kg),

ΔT_V : olvadék forrásához szükséges hőmérséklet-különbség (K),

L_V : párolgási látens hő (J/kg).

Ha a térfogatra (V) és sűrűsége (ρ) is tekintettel vagyunk, az alábbi képletet kapjuk [11]:

$$Q_a = \rho \cdot V \cdot (c_p \cdot \Delta T_m + L_m + c_p \cdot \Delta T_V + L_V) \quad (3)$$

Ezzel meghatároztuk az abszorbált energiát, és hogy teljesítményt kapjunk, el kell osztani az alapanyag megolvasztásához szükséges idővel. Ha nem pontozást hajtunk végre:

$$t = \frac{\Delta x}{v} \quad (4)$$

képlettel határozhatjuk meg, ahol Δx a megolvasztott hossz (mm), v a hegesztési sebesség (mm/s). Ennek tudatában a teljesítmény számítása:

$$P = \frac{Q_a \cdot v}{\Delta x} \quad (5)$$

Kézi sugárvezetés folyamán a hegesztési sebesség nehezen meghatározható és konstans értéken tartható, így az olvadási energiaigény szerinti megközelítés:

$$P = \rho \cdot \dot{V} \cdot (c_p \cdot \Delta T_m + L_m + c_p \cdot \Delta T_V + L_V) \quad (6)$$

ahol:

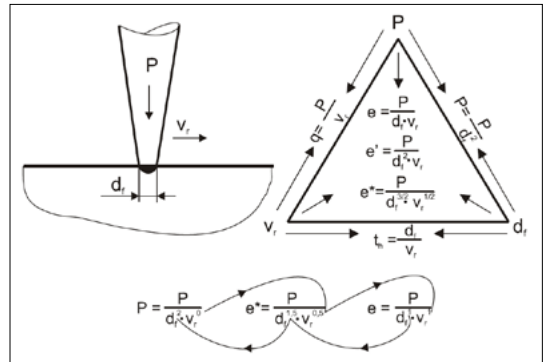
$\dot{V}$: az olvadt anyag térfogata egységnyi idő alatt (m^3/s).

2.2. A hegesztési sebesség

A hegesztési sebesség (előtolás) az egyik legkritikusabb folyamatparaméter a hegesztések során, mivel közvetlen hatással van a beolvadási mélységre, a varratgeometriára, valamint a hőhatásövezet (Heat Affected Zone – HAZ) kiterjedésére [3, 9]. A sebesség növelése csökkenti a fajlagos hőbevitel mértékét, ezáltal kisebb olvadáktócsát és sekélyebb beolvadást eredményez, míg kisebb sebesség esetén mélyebb beolvadás és szélesebb varratprofil figyelhető meg [3, 9].

Az előző fejezet összefüggései a Rosenthal-egyenlet szerint történtek, ennek átrendezéséből képesek vagyunk a hegesztési sebességet is kifejezni. Egy másik megközelítést szemléltet a 2. ábra. Itt három paraméter egymásra hatását vázolja, nevezetesen a teljesítmény (P), a relatív sebesség (v_r) és a sugár foltátmérője (d_r) között [11].

Az ezen paraméterek között képzett két-két hánnyados jól értelmezhető, fizikai jelentéssel bíró mennyiségeket eredményez. Ezek a hánnyadosok a teljesítménysűrűség (p ; W/mm^2), a fajlagos hőbevitel (q ; W/mm), valamint „egy felületi anyagi pont fókuszfoltban való tartózkodási ideje” (t_h ; s) [11]. A teljesítménysűrűség mutatja, hogy mennyire koncentrált a lézer által leadott teljesítmény



2. ábra. Nagy energiasűrűségű megmunkálások paraméter-összefüggései [11].

egységnyi területen. Ezért kell egy fókuszgeometriai faktorról (Y ; -) módosítani a nevezőt: négyzetes folt esetén $Y=1$, kör keresztmetszet esetén (gyakoribb) $Y = \pi/4$ (1). A fajlagos hőbevitellel (vonalenergia) érzékeltetjük az 1 mm hosszon közölt hőenergiát. Ezzel képesek vagyunk megjósolni a végeredményt: kis P/v_r esetén sekélyebb beolvadás tapasztalható, gyorsabb hűlés következik be, aminek eredménye martenzites szövetszerkezet (szénacéllok), mely növeli a repedésveszélyt [10]. Érdemes ezen hánnyadost nagyobb értéken tartani a megfelelő kötés érdekében. A hatásidőtartam ezzel összefügg: minél több ideig közöltünk egy adott anyagi ponttal energiát, annál nagyobb hőmérsékletre hevül, így a hűtési sebesség csökken, martenzitmentes szövetszerkezetet eredményezve.

Az előbbi számításokból tudunk tovább következtetni: meghatározható a felületi energiasűrűség („planimetrikus energiabevitel”, e ; J/mm^2), a térfogati energiasűrűség (volumetrikus energiabevitel, e' ; J/mm^3) és az egységnyi hatásosság (e^* ; $\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$) értékei. A felületi energiasűrűség érzékelteti az egységnyi felülettel közölt energiát, a térfogati energiasűrűség az egységnyi térfogatra vetíti ezt. A teljesítménysűrűség és a felületi energiasűrűség képletek súlyozásából következik az egységnyi hatásosság (2. ábra alsó része), amely leírja, hogy egy adott beviteli teljesítmény mellett milyen mértékben hatékony az energia-anyag átadás a munkadarabra [11].

2.2.1. Hegesztési sebesség hozaganyaggal

Hozaganyag nélküli hegesztés folyamán az alkalmazott hőforrás energiája az alapanyag megolvasztására szolgál. Ha alkalmazunk töltőanyagot, annak megolvasztása miatt többlet-teljesítményre lesz szükségünk [12]:

$$P_{extra} = \dot{m} \cdot \Delta T \cdot c + \dot{m} \cdot L_f \quad (7)$$

ahol:

$\dot{m}$: huzal tömegárama (g/s),

ΔT : huzal és annak olvadáspontja közötti hőmérséklet-különbség (K),

c : hozaganyag fajhője (J/(g·K)),

L_f : acél fajlagos olvadáshője (J/g)

Ebből a képletből egy ismeretlenünk van, a huzal tömegárama, amelyet a következőképp számolhatunk [13]:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{huzal} \cdot v_w \quad (8)$$

ahol:

ρ : sűrűség [g/cm³],

A_{huzal} : huzal keresztmetszete [mm²],

v_w : huzal előtoló sebessége [mm/s],

Ennek ismeretében meghatározható a többlet- teljesítmény-igény az energiamérleg alapján [1], így a módosított hegesztési sebesség:

$$v_{új} = v_{alap} \cdot \frac{P_{alap}}{P_{alap} + P_{extra}} \quad (9)$$

2.3. Hőbevitel

A Rosenhalt-egyenlettel és Bagyinszki–Bitay-féle megközelítésekkel ki lehet fejezni ezen paramétert is. A fedett ívű hegesztéseknél is fontos szerepet játszik a közölt hő, ennek becslésére ad példát az EN 1011-1 szabvány. Lézeres megmunkálásra hasonló képletet alkalmaznak [10]:

$$Q = \frac{\eta \cdot P}{v} \quad (10)$$

ahol:

η : hatásfok (-), ami függ a lézerforrástól és a fény-anyag kölcsönhatástól.

Érdemes foglalkozni vele, hiszen a megmunkálás eredményéről informál minket: a nagy hőbevitel eredménye a lassabb hűlés, ezáltal a várható szövetszerkezet nem tartalmaz martenzitet, ami miatt a repedésérzékenység csökken, viszont ha túl nagy a hőbevitel (nagyon lassú hűtés), szemcsedurulás következhet be [13]. A repedékenységi jóslására szolgál még az ISO 9606-1:2012 szabvány IIW (International Institute of Welding) szerinti karbonegyenérték-számítás is, amivel megállapítható, hogy kell-e munkadarab-előmelegítés a megfelelő kötés érdekében (CE < 0,4; nem kell előmelegíteni, föltötte egyre indokoltabb) [3, 9].

2.4. Beolvadási mélység

Lézeres hegesztés beolvadási mélységét a Rosenthal-egyenlettel szokás megbecsülni. Ezen

egyenlet feltételezi, hogy a varrat szélességének fele a beolvadási mélység és hőforrás pontszerű, amely egyenletes sebességgel mozog a munkadarabon, és a hőátadást elsősorban a hővezetés révén írja le [1]. Ennek az egyenletnek kettő- és háromdimenziós változata is van, a 2D-s felrakó hegesztésekre alkalmazható, ahol a beolvadási mélység elhanyagolt [1, 10]. Mivel ezt szeretnénk kifejezni, a 3D-s modellt kell alkalmazni, ahol feltételezett a hőforrás kiterjedése és Gauss-féle energieloszlása:

$$T - T_0 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \exp\left(\frac{v_x \cdot \xi}{2 \cdot \kappa}\right) \times K_0\left(\frac{v_x \cdot r}{2 \cdot \kappa}\right) \quad (11)$$

ahol:

k : hővezetési együttható (W/(m·K)),

h : beolvadási mélység (m),

v_x : hőforrás sebessége x irányban (m/s),

ξ : a forrás helyzetétől mért effektív távolság Lagrange-koordináta-rendszerben (m),

κ : hődiffúziós együttható (m²/s),

K_0 : módosított Bessel-függvény nulladik rendje. Érdemes megjegyezni, hogy ezen egyenletet módosítani kell, ha nem szénacélokkal vagy nem folyamatos lézerforrással dolgozunk [14].

2.5. Védőgáz áramlása

A lézeres hegesztések az ömlesztőhegesztések kategóriájába tartoznak [3, 9]. Emiatt az olvadékat védeni kell a környezettől (oxidáció, szennyeződések), ami védőgázzal (védőgázelegyekkel) abszolválható. Ezt a közeget közvetlenül az olvadéktócsára irányítjuk adott áramlási sebességgel. A gázáramlás (l/min) befolyásolja a kötés küllemét, ezáltal mechanikai tulajdonságait. Minőségi varrat érdekében lamináris áramlást kell biztosítanunk, de egyes esetekben csak átmeneti áramlási viszonyokkal érhető el [10, 14]. Ennek bizonyítását a Reynolds-számmal tudjuk érzékeltetni.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{spot}}{\mu} \quad (12)$$

ahol:

Re : Reynolds-szám (-),

ρ : a közeg sűrűsége (kg/m³),

v : a közeg áramlási sebessége (m/s).

A Reynolds-szám a közeg (légnemű/ folyékony) áramlásának jellegét írja le: lehet lamináris (rendezett; $Re < 2320$), átmeneti ($2320 < Re < 4000$) vagy turbulens ($Re > 4000$) [15]. A védőgáz áramlásánál ez kulcsfontosságú, mert a turbulencia gázpórusokat vagy egyenetlen védelmet okozhat a hegesztési zónában [3, 9]. Hővezetési lézeres hegesztés folyamán lamináris áramlást kell bizto-

sítani, viszont mélyvarratos lézeres hegesztésnél gyakoriak az átmeneti áramlási viszonyok [14]. Oka a technológia sajátosságaiból fakad: hogy mélyebb rétegekbe eljuthasson a közölt energia, a kulcslyuknak (keyhole, 1. ábra jobb oldala) nyitva kell maradnia, a keletkező plazma és fémgőz mértékét közben kell tartani, mivel optikai közegként vannak jelen, és befolyásolják az energiátovábbítást [2, 16].

Hegesztés folyamán a védőgáz reduktorán tudjuk beállítani a kívánt gáznyomást. Szakemberek számára ez nem kielégítő adat, hisz térfogatáramra szoktak WPS-t (Welding Procedure Specification) alkotni:

$$Q = A_{spot} \cdot v = A_{spot} \cdot \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot d_{spot}} \quad (13)$$

Ha a reduktor után nem táplálunk be egy áramlásmérőt, akkor először a nyomásesést (ΔP) kell meghatározni a Bernoulli-egyenlettel (elhanyagolva a magasságváltozást) [15]:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (14)$$

ahol:

P_1 : a nyomása (Pa),

P_2 : a fúvókán kilépő nyomás (Pa),

v_1 : a reduktor kimeneti közegsebessége (m/s),

v_2 : a fúvókán kilépő közegsebesség (m/s).

Ennek tudatában a reduktoron beállítandó nyomásérték a nyomásesés és a fúvókán kilépő nyomás összege. Fontos megjegyezni, hogy a képlet módosul, ha a fúvóka hossza nem elhanyagolhatóan hosszú [9].

Megállapítható, hogy a lézeres hegesztés paramétereinek megállapítása adott feladatra komplex tevékenység. A szakemberek munkájának segítése érdekében az előbb bemutatott számítások szimulációk alapjait is képezik [11, 14]. Ha ezekhez nem férünk hozzá, érdemes kísérletsozortat véghez vinni a tanulmányokban említett paraméterekkel, amit a továbbiakban optimalizálunk a megoldandó feladatra.

3. Kísérlet

A sikeres kézi lézeres hegesztés kulcsa a megfelelő technológiai paraméterek gondos megválasztása, amelyeket az előző fejezetben elemeztünk. A jelen fejezet célja a gyakorlati kísérleti vizsgálat bemutatása, amelyet az Intertechnika csepei műhelyében végeztünk, egy IPG Photonics LightWeld 1500 XC típusú kézi lézeres berendezés (3. ábra) segítségével. Ez az eszköz gyárilag előre beállított

hegesztési programokat alkalmaz (4. ábra), így bizonyos bemeneti paraméterek (teljesítmény, sugárprofil) pontos értékei nem hozzáférhetők. Ennek ellenére vizsgálatunk középpontjában annak megállapítása volt, hogy ezek a gyári beállítások mennyire biztosítanak megfelelő minőségű kötéseket.

Az alkalmazott berendezés napjaink legprofesszionálisabb kézi lézerforrása [17]. Az 1. táblázat ismerteti a lézerforrás tulajdonságait.

1. táblázat. IPG Photonics LightWeld 1500 XC gépi adatok [8]

Paraméter	Érték
Lézerteljesítmény (HPP-impulzus üzemmódban)	150–2500 W
Lézerteljesítmény (CW-folyamatos üzemmódban)	150–1500 W
Üzemmódok	CW, Track, Modulation, HPP, Stich, Clean, ADV. Stich
Lézerforrás hullámhossza	1070 nm
Lengésfrekvencia	0–300 Hz
Lengéshossz	0–15 mm
Bemeneti feszültség	200–240 V
Áramfelvétel teljes terhelésnél	24 A
Névleges teljesítmény	4600 VA



3. ábra. IPG Photonics LightWeld 1500 XC kézi lézerforrás és IPG LightWELD WF-100 huzalelőtoló berendezés

METAL	SHIELDING GAS	MODE	WELD DEPTH			
			0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.180" (4.0mm)
STAINLESS STEEL	NITROGEN	CW	A1	A2	A3	A4
		M	C1	C2	C3	-
		W	A6	A7	A8	A9
MILD STEEL	NITROGEN	CW	E1	E2	E3	E4
		M	F1	F2	F3	-
		W	E6	E7	E8	-
GALVANIZED STEEL	NITROGEN	CW	-	-	-	-
		M	J1	J2	J3	-
		W	-	-	-	-
ALUMINUM 3XXX	ARGON	CW	-	-	-	-
		M	H1	H2	H3	H4
		W	-	-	-	-
ALUMINUM 5XXX	ARGON	CW	-	-	-	-
		M	L1	L2	L3	L4
		W	L6	L7	L8	L9

4. ábra. Berendezés programtáblázata [8]

Felhasználóbarát, ezért egy – a géphez tartozó – táblázat alapján csak programot kell kiválasztani az alapanyag, lézermód és beolvasási mélység függvényében (4. ábra). A kísérletek folyamatos üzemmódban történtek hozaganyaggal és hozaganyag nélkül (lásd a táblázat CW és M sorait). Hozaganyagos hegesztéshez IPG LightWELD WF-100 huzalelőtölő berendezést használtunk.

3.2. A kísérlet alapanyagai

Különböző beolvasási mélységek mellett kívántuk vizsgálni, így 1 mm-es lemeztől 5 mm-ig mm-ként növeltük a lemezvastagságot. Környezetünkben nem állt rendelkezésre egy adott anyag-típusból mindegyik méret, ezért DC01 (1 és 2 mm) és S355J2 (3 mm-től felfele) jelű szénacélokon kísérleteztünk. Minden esetben egyoldali sarokvarratot készítettünk T elrendezésben, amit a lemezvégek előzetes összefűzésével biztosítottunk. A hozaganyag programmód is érdekelt minket (W: Wire welding), ehhez Böhler EMK 8 Ø1 mm tömör huzalelektrodát használtunk. A 2. táblázat nyomán minden esetben 4.6 tisztaságú nitrogént alkalmaztunk védőgázként 0,2 MPa üzemi nyomáson.

2. táblázat. Kísérlet alapanyagainak összetétele

Anyag	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%
S355J2	0,2	0,55	1,6	0,025	0,035	0,55
DC01	0,12	-	0,6	0,045	0,045	-
EMK 8	0,11	1	1,8	-	-	-

3.3. Vizsgálat

Az alkotott varratokat minősíteni kívántuk, így penetrációs vizsgálatot vittünk véghez, és később mikroszkópi csiszolatokat készítettünk optikai vizsgálódás és keménységmérés érdekében.

A folyadékbehatolásos vizsgálatot az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán végeztük. A vizsgálatot az ISO 3452-1:2021 szabvány szerint végeztük el. (5. ábra)

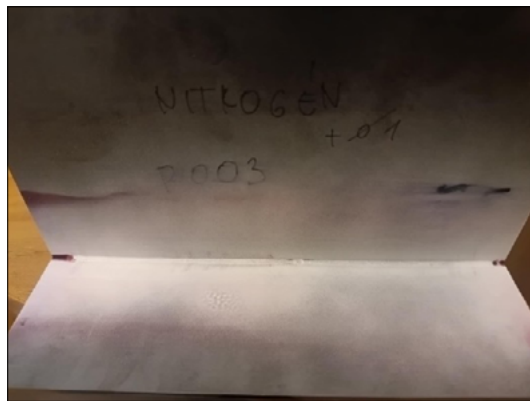
A metallográfiai vizsgálatot a budapesti Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Non-profit Kft. telephelyén készítettük. Az MSZ EN ISO 15614-1:2023 szerint munkáltuk ki a vizsgálandó keresztmetszetet: vékonyabb munkadarabokat lemezollóval daraboltunk, 4 mm-es lemezektől sarokcsiszolót alkalmaztunk. Ezzel a megoldással jóval nagyobb területet vágunk ki az esetleges hőkezelés miatt, a továbbiakban abrazív vágógéppel hoztuk beágyazható méretűre vizes elárasztás mellett. A mintakészítés az MSZ EN ISO

1463:2021 szabvány szerint készült. Mivel csak a varratok alakját és esetleges hibákat kerestünk, így 1 µm-es gyémánt szuszpenzióig políroztunk (makró felvételek). A szövetszerkezet láthatóvá tételéhez 5 %-os Nitalt használtunk. (6. ábra)

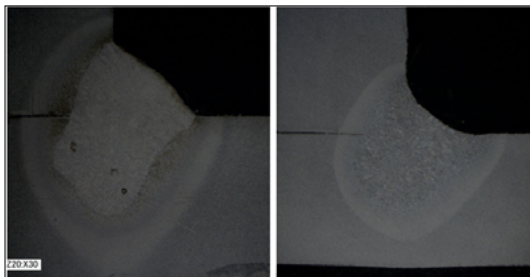
A keménységmérést az egyetem falain belül végeztük, Vickers eljárást alkalmaztunk 200 g-os terheléssel, mivel a hőhatásövezetek a technológiától elvártan keskenyek. Ennek eredményeiben semmi kirívót nem találtunk, az alapanyagoktól a varratig haladva egyre nagyobb keménységértékeket regisztráltunk.

3.4. Eredmény

A szemrevételezés és penetrációs vizsgálatok folyamán megállapítottuk, hogy semmiféle, a varrat felszínére kifutó anyaghiba nem volt. A mikroszkópi felvételeken látható, hogy gömb alakú, pórusos varratok készültek (MSZ EN ISO 6250-1:2008 szerint 2011 hibakód) a gyártó által ajánlott paraméter-táblázattal. Legvalószínűbb oka az egyenlőtlen sugárvezetés és a pisztoly pozícióba tartásának bizonytalansága lehet.



5. ábra. S355J2 3mm vastag lemez E8 jelű programmal, hozaganyaggal hegesztett minta penetrációs vizsgálatának eredménye



6. ábra. E4 programmal készített S355J2 jelű minták: 5 mm-es hozaganyag (bal) és 4 mm-es alapanyagába hegesztett (jobb) kötések

4. Konklúzió

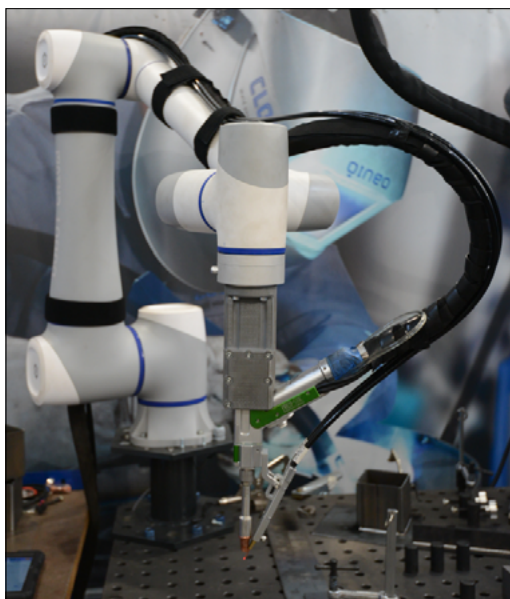
A minőségi hegesztés kulcsa az alkalmazott technológia ismerete. Sok esetben szabad hagyatkozni triviálisnak tűnő, empirikus képletekre, segédletekre. Ha biztosra szeretnénk menni, érdemes optimalizált technológiai paramétereket kidolgozni, szimulálni.

A lézeres hegesztés egyik érzékeny paramétere a hegesztési sebesség, a kézi sugárvezetés bizonytalansága miatt. Bár többletköltséget jelent (többmillió forinttal), ha hegesztési eljárást specifikációt (WPS: Welding Procedure Specification) szeretnénk alkotni sorozat- vagy tömeggyártás érdekében, érdemes collaborative robottal integrálni a lézerforrást [4].

A 4. ábrán látható paraméter-táblázat meghatározza a hegesztés védőgázát (nitrogén). Bár a metallográfiai csiszolatokon nem volt tetten érhető, érdemes más, iparban gyakran alkalmazott védőgázzal kísérletezni, hiszen a nitrogén képes az alapanyagok ötvözőivel nitrideket képezni (esetünkben Mn_4N - és Si_3N_4 -kiválások lehettek volna).

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton szeretnék köszönetet mondani az Intertechnika Kft.-nek a kísérleti hegesztések kivitelezésében, a berendezés adatainak közlésében és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Non-profit Kft.-nek a metallográfiai mintaalkotásban és mikroszkópi felvételek készítésében.



7. ábra. CR10A Dobotra szerelt FWH20-S10A lézeres hegesztőpisztoly [4]

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] E. Kannatey-Asibu Jr.: *Principles of Laser Materials Processing Developments and Applications*. 2nd edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2023.
- [2] Buza G.: *Lézersugaras Technológiák I.* Edutus Főiskola, Budapest, 2012.
- [3] Gáti J. (szerk.): *Hegesztési Zsebkönyv I.* Cokom Mérnökiroda Kft., Budapest, 2023.
- [4] Gáti J., Kovács T., Nagy B.: *Gépesített kézi lézeres hegesztés gyakorlati tapasztalatai.* Hegesztéstechnika, XXXIV/ 4. (2024) 43–47.
- [5] General Electric Company. Industrial hand held laser tool and laser system (US4564736A), Amerikai Szabadalmi Hivatal 1986. <https://patents.google.com/patent/US4564736A/en>
- [6] Halász G.: *Kézi lézeres berendezések biztonságos használata.* Hegesztéstechnika XXXV/1. (2024) 41–47.
- [7] MSZ EN ISO 4063:2023: Hegesztés, forrasztás és termikus vágás. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk.
- [8] LightWELD® Sorozatú Kézi Lézerhegesztő Rendszer Eredeti Használati Útmutató Fordítása, dokumentumszám: DOCCHUGMPSHU0018, Rev:2 (2023. november 29.)
- [9] Bagyinszki G., Bitay E.: *Hegesztéstechnika I.: Eljárások és Gépesítés.* Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010. <https://doi.org/10.36242/mtf-08>
- [10] Volpp J.: *High-Power Laser Material Processing for Engineers.* Taylor & Francis Group, LLC, 2025.
- [11] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés.* Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007. <https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [12] Salminen Antti Sakari: *Effect of welding parameters on the efficiency and energy distribution during laser welding with filler wire.* ICALEO 2001, Laser Institute of America, 2001. 409–418. <https://doi.org/10.2351/1.5059891>
- [13] Messler, R. W.: *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy.* Wiley, 2004. 167–168.
- [14] Hekmatjou H., Zeng Z., Shen J., Oliveira J. P. Nafakh-Moosavy H.: *A comparative study of analytical Rosenthal, finite element, and experimental approaches in laser welding of AA5456 alloy.* Metals, 10/4. (2020) 436. <https://doi.org/10.3390/met10040436>
- [15] Lajos T.: *Az áramlástalan alapjai.* 5. kiadás, Akadémiai Kiadó, 2024. <https://mersz.hu/lajos-az-aramlantan-alapjai/>
- [16] Buza G., Erős A., Fazekas É.: *A hegesztési munkagáz összetételének hatása a plazmaképződésre a lézersugaras hegesztés során.* Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, 148/6. (2015).
- [17] https://spark-co.com/en/2024/05/24/ipg-light-weld-what-you-need-to-know/?utm_source=chatgpt.com (letöltve: 2025. április 16.)