



A maximális hézag meghatározása lézeres hegesztéshez

Determination of Maximal Gap for Laser Welding

Nagy Balázs,¹ Kovács Tünde Anna²

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

² kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Nowadays laser welding is widely used in industrial applications. Often, steel sheets are welded without welding material by using this process. The research aims to determine the maximal gap size and the related welding parameters for the laser welding of a 3 mm thick steel sheet of S235J2 steel grade. During welding, a joint gap may occur due to inadequate edge preparation, which must be considered during the design of the technology. The result of the experiments is that using the Trumpf TLF 5000 turbo-type carbon dioxide laser of 4.5 kW power, 3000 mm/min welding speed, with a focus the maximal gap size is 0.10 mm, while at 2000 (mm/min) welding speed, with 5 mm above focus the maximal gap size is 0.27 mm which can be welded with acceptable seam quality.

Keywords: *unalloyed steel, laser welding, welded joint, joint gap.*

Összefoglalás

A lézeres hegesztést napjainkban igen elterjedten alkalmazzák az iparban. Számos esetben acéllemezeket hegesztőanyag nélkül hegesztenek össze ezzel az eljárással. A kutatás célja a maximális hézagot és a hozzá tartozó hegesztési paramétereket meghatározni S235J2 acélminőségű 3 mm vastagságú acéllemez lézeres hegesztéséhez. A hegesztésnél a nem megfelelő élelőkészítés miatt adódhat hézag, amit a technológia tervezése során figyelembe kell venni. A kísérletek eredménye: a Trumpf TLF 5000 turbo típusú, szén-dioxid-lézer alkalmazásával, 4,5 kW teljesítmény, 3000 mm/min hegesztési sebesség, fókuszban hegesztve 0,10 mm rés, míg 2000 mm/min hegesztési sebesség, +5 mm fókusztolással 0,27 mm rés hegeszthető át elfogadható varratminőséggel.

Kulcsszavak: *S235J2, lézeres hegesztés, hegesztett kötés, illesztési hézag.*

1. Bevezetés

Az 1970-es években piacra került lézeres megmunkálórendszerek szélesebb technológiai sávon nyújtottak előnyöket a meglévő gyártórendszerekhez képest, valamint teljesen új alkalmazási lehetőségeket nyitottak meg. A fejlődés ezen a téren folyamatos. Mára a lézeres technika a gazdasági és magánélet területét is elérte. Néhány példa: az autógyártás nélkülözhetetlen technológiai eleme (vágás, fúrás, hegesztés, edzés) [1, 2].

Az anyagmegmunkálásban használt teljesítménylézerek esetében a nyers lézernyaláb átmérőjét fókuszállással csökkentjük, hogy megfelelő

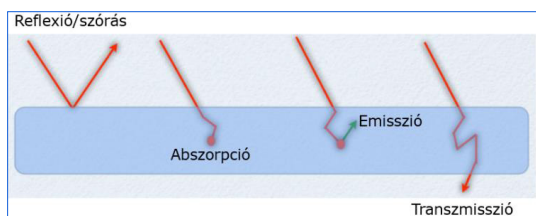
teljesítménysűrűség alakuljon ki a foltban, valamint, hogy a foltméret illeszkedjen a megmunkálási területhez. A fókusztolás lencsék és tükrök segítségével történhet. A folt mérete a fókusztól és az optika között közel lineárisan változik, így meghatározható, hogy mekkora a folt átmérője a fókusztól adott távolságban [3, 4]. „Amennyiben a munkadarab a fókusztávolságon kívül helyezkedik el, akkor pozitív fókusztolásról, ha azon belül, akkor negatív fókusztolásról beszélünk” [5].

A lézernyaláb egy része visszaverődhet a felületen, egy része bejuthat az anyagba. A bejutott hányad egy része elnyelődhet, ott hővé alakulhat.

Az el nem nyelt hányad keresztüljutva a munkadarabon kilép abból. E három kölcsönhatástípus együttesen ki kell hogy adja a kezdeti intenzitást. Az abszorpció során az intenzitás a mélység irányában exponenciálisan csökken. Ez a csökkenés függ az anyag összetételétől, szerkezetétől (kristályos vagy amorf) és a lézersugárzás hullámhosszától. A behatolási mélységet a felületi intenzitás $1/e$ arányú csökkenése alapján határozzuk meg. Fémek esetén a lézerefény áteresztése nulla, ezért a reflexió és az abszorpció összege megegyezik a kiinduló intenzitással. Tehát ha ismerjük az egyik adatot, akkor a másikat kiszámíthatjuk. Az **1. ábrán** látható a lehetséges kölcsönhatások közül az emisszió, aminek köszönhetjük a lézersugárzási jelenséget, a szilárdtestlézerek alapját képezi.

A fémek esetében az abszorpció mikrométeres vagy annál kisebb behatolási mélységben történik. A lézersugárzás az anyagban való elnyelődése során a felület közelében lévő szabadelektronokat gerjeszti, növelve a mozgási energiájukat. Az energiát az atommagok felé közvetíti, amelyek rezgésekben egyre nagyobb amplitúdóval rezegnek. Ennek következtében a felületi rétegekben a hőmérséklet növekszik. Az elnyelt energia hővezetéssel továbbterjed a mélyebb rétegekbe. A hőmérséklet növekedésével az abszorpció is növekszik. Az olvadáskor bekövetkező halmazállapot-változásnál megfigyelhető egy ugrásszerű növekedés, ami azt jelenti, hogy a szilárd és olvadék fázisban az anyag különböző mértékben nyeli el a lézersugárzást.

A lézersugárzás alkalmazási célja alapján hét csoportot szokás figyelembe venni: hétköznapi és szórakoztató, ipari és anyagmegmunkálási, orvosi, mérési és szabályozástechnikai, energetikai, harcászati, tudományos és kutatási. Az ipari és anyagmegmunkálási célú lézerberendezéseknél minden esetben a lézernyaláb teljesítményét (energiatartalmát) használják fel az anyagmegmunkálásra, amely az anyagban részben elnyelődik, hővé alakul, és különböző hatásokat eredményez (hevít, olvaszt, elpárologtat, plazmaállapotba visz, vegyületeket elbont, anyagátalakulást hoz létre) [4–6].



1. ábra. Fény-anyag kölcsönhatás lehetséges esetei

A lézereket négy fő csoportra szokás bontani az aktív lézerközegük halmazállapota szerint: gáz, szilárdtest, félvezető és festéklézerek.

1.1. Gázlézerek

A gázlézerek aktív közegként gázt használnak, például hélium-neon keveréket, argont (annak ionjait), excimer (Ar_2 , F_2) / exciplex (nemesgáz és egy halogenid elem keveréke, pl.: XeCl) lézerek gázkeverékeit, és általában alkalmazott szén-dioxidot. A gáz alkalmazásának előnyei, hogy homogén, viszonylag olcsó és könnyen utántölthető. Hátránya, ami a fizikai természetéből adódik, hogy kicsi sűrűségű és így nagy mennyiségű gázra van szükség ahhoz, hogy a populációinverzió bekövetkezzen [4, 5].

1.2. He-Ne lézer

A He-Ne lézer (1961 Bell Laboratories) az első olyan lézertípus, amellyel folytonos lézersugárzást tudtak megvalósítani. Az ipari gyakorlatban igen kedvelt, széles körben elterjedt lézertípus. Mindkét gáz egy üvegcsőben található, ahol a nyomás (néhány 100 Pa) kisebb, mint a légköri nyomás, mivel csak így lehet benne elektromos gázkisülést előidézni [4, 5].

1.3. Ar-ion lézer

Az Ar-ion lézerek (ahogyan a nemesgázion-lézerek is) a színekép látható és közeltéri UV-tartományában sugároznak. Ennél a lézerközeg kis nyomású argon, amelyben 30–50 A áramerősségű egyenáram hozza létre a populációinverziót. Az Ar-ion lézerek impulzusüzemben működnek, de alkalmazható gyűrűkisülés is, hogy folytonos kimenő sugárzást érjenek el. Maximális teljesítménye a 100 W-os nagyságrendbe esik [4, 5].

1.4. Excimer- / exciolexlézer

Az excimer kifejezés klasszikus jelentése: egy gerjesztett, azonos atomokból álló (homopolár) molekula (pl. Ar_2 , F_2). Manapság már elterjedtebb az egy nemesgáz és egy halogenid elem keveréke (heteropolár, pl. XeCl), így a helyes kifejezés az exciplex (excited complex) lézer lenne, de a gyakorlatban ez nem terjedt el (szerencsére ezen anyagokat aktív lézerközegként használva hasonlóan működnek). Az excimerlézerekben általában valamilyen nemesgáz vagy nemesgáz és halogén alkot kétatomos molekulát. Az excimerlézerek alkalmazhatók szerves anyagok és biológiai szövetek hőmentes elpárologtatására (abláció), melyet a nagy fotonenergia és az UV-tartományra jellemző nagyfokú abszorpció tesz lehetővé. Emellett használják festéklézerek gerjesztésére

és anyagmegmunkálásra is, a chipgyártásban például a fotolitográfia fényforrásoként alkalmazzák [4, 5].

1.5. Szén-dioxid-lézer

A CO₂-lézer a szén-dioxid-molekula vibrációs szintjei között működik, ez a legnagyobb teljesítményű gázlézer, amelynek határfoka is a legnagyobb (15–20%). Az aktív lézerműködés CO₂-, N₂-, He-vagy H₂O-gőz körülbelül 1:1:8 arányú keveréke [4, 5].

1.6. Szilárdtestlézerek

A szilárdtestlézerek az utóbbi időben méltó ellenfelei lettek a CO₂-lézereknek. A lézermédium ez esetben szilárd halmazállapotú anyagok (Nd:YAG, Nd:üveg, alexandrit, Ti:zafir stb.). Fontos kitékintés, hogy a kis teljesítményű félvezetőlézereket is a szilárdtestlézerekhez csoportosítják.

A YAG-alapú verzió terjedt el leginkább, amelynek legfontosabb fajtái:

- villanólámpával gerjesztett YAG-lézer,
- diódalézerrel gerjesztett YAG-lézer,
- YAG koronglézerek (hibrid) [1].

A lézeres hegesztés az elmúlt néhány évtizedben jelentősen fejlődött. Számos lézeres megmunkálási eljárás ismert és alkalmazott a mai ipari gyakorlatban. Jellemzően a lézeres vágás terjedt el, de a lézeres hegesztés is egyre inkább alkalmazott az ipar számos területén. A lézeres megmunkálások alkalmazási területeit az alkalmazott lézerek, az ezekkel elérhető teljesítmény és a lézer típusa is döntően meghatározzák [7–9].

Számos kutatási eredmény ismert a speciális anyagok kötéseinek lézeres hegesztéséről [8–10].

A kutatás célja annak a legnagyobb illesztési hézagnak a meghatározása, amikor a lézeres hegesztéssel a még megfelelő varrat létrehozható a Trumpf TLF 5000 turbo CO₂-lézerrel.

2. Kísérletek

2.1. Felhasznált anyag

A kísérletet S235J2 minőségű acéllemezeken végeztük, kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza. Ez az acélminőség jól hegeszthető, lézeres hegesztésre is megfelelő, mivel az alapanyag fe-

1. táblázat. Az S235J2 acél kémiai összetétele (m%).

Elemek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
%	<0,17	–	1,4	0,025	0,025	<0,55	Maradék

lületének reflektivitása kicsi, hővezető képessége 54 W/(m²·K), hőtágulása 1,2·10⁻⁵ 1/°C.

A felhasznált acél mechanikai tulajdonságai R_{p0,2} = 235 MPa, R_m = 540 MPa, szakadási nyúlása minimum A ≥ 24 %, sűrűsége ρ = 7,85 kg/dm³. A kísérletekhez 3 mm vastagságú lemezeket használtunk fel.

2.2. Hegesztési kísérletek

A kísérleteket a Bay Zoltán alkalmazott kutatási közhasznú nonprofit Kft.-nél végeztük Trumpf TLF 5000 turbo típusú szén-dioxid-lézerrel, hullámhossz: 10,6 μm, 4,5 kW teljesítmény, öten-gyeges CNC-vezérlés. A berendezés munkatere 1600×1000×400 mm, alkalmas vágásra, fúrásra, hegesztésre és hőkezelésre is.

A hegesztési paraméterek meghatározásához hernyóvarratos próbahegesztéseket végeztünk. A hernyóvarratos hegesztés során nem alakítunk ki kötést egy másik darabbal (2. ábra).

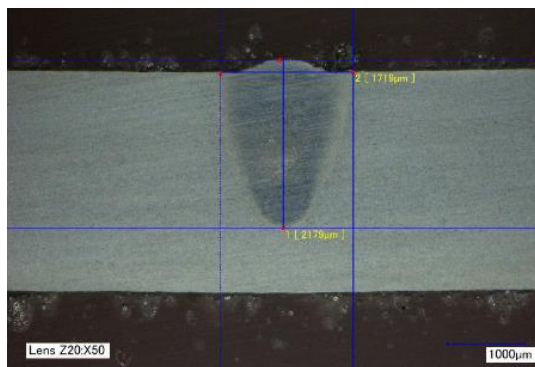
Az állandó paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. A hegesztés során három különböző sebességet (500 mm/min, 2000 mm/min, 3000 mm/min), valamint három fókuszhelyzetet alkalmaztunk (0, +5, +10 mm), így kilenc hegesztést végeztünk.

A hernyóvarratos hegesztési kísérletek eredményeit értékeltük (beolvadási mélység, szemrevételezés), és ennek alapján határoztuk meg a további kísérletek paramétereit.

Az átheszthető hézag meghatározására a két

2. táblázat. Állandó hegesztési paraméterek

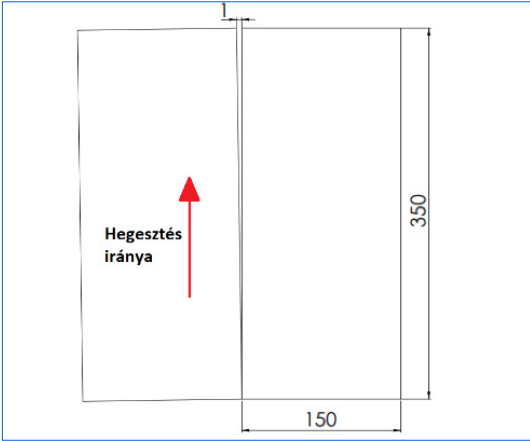
Kitöltés	Teljesítmény (W)	Fúvóka távolsága (mm)
CW (folyamatos üzem)	4500 (90%)	1
Munkagáz	Gáznymás (bar)	Munkagáz mennyisége (l/min)
Hélium 4,6	5	6



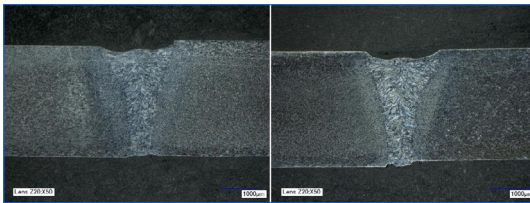
2. ábra. Egy hernyóvarrat metszete

3. táblázat. Kísérleti paraméterek

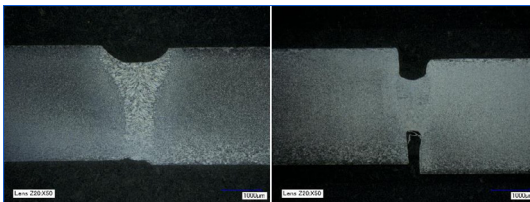
Minta jele	Fókuszeltolás (mm)	Teljesítmény (W)	Hegesztési sebesség (mm/min)
A	0	4500	3000
B	+5	4500	2000



3. ábra. Kísérleti elrendezés



4. ábra. Elfogadható varratkeresztmetszet; fókuszeltolás: 0 mm



5. ábra. Megfelelő varrat +5 (mm) fókuszeltolás

4. táblázat. Keménységértékek

Minta jele	Átlagos Keménység HV10		
	Alapanyag	Hőhatás-övezet	Varrat
A	130	150	190
B	130	160	200

lemezt a **3. ábra** szerinti elrendezéssel hegesztettük, ahol a lemezek egyik felét összeillesztettük, a másik oldalt 1 mm-re eltávolítottuk egymástól hézagolólemez segítségével.

A hegesztési paramétereket a **3. táblázat** foglalja össze.

3. Eredmények

A próbahegesztés végeztével megállapítottuk, hogy fókuszban hegesztve (0 mm) esetén, 0,1 mm hézag mellett, megfelelő varratot eredményez. A **4. ábrán** látható a 0,1 mm réstávolságú minta hegesztett varratának keresztmetszete, amit 4,5kW teljesítménnyel és 3000 mm/min hegesztési sebességgel hegesztettünk.

A két lemez összeolvadása megtörtént, a kötés kialakult.

Megállapítottuk, hogy +5mm fókuszeltolással 0,27 mm hézag volt áthegeszthető, megfelelő varratminőség mellett. Az **5. ábrán** látható a 0,27 mm réstávolságú minta hegesztett varratának keresztmetszete, amit 4,5 kW teljesítménnyel és 2000mm/min hegesztési sebességgel hegesztettünk.

Szakítóvizsgálatot végeztünk a varrat megfelelőségének ellenőrzésére. Megállapítottuk, hogy minden esetben a szakadás az alapanyagban következett be, ami a hegesztett kötés megfelelőségét erősíti meg (**6. ábra**).

Keménységméréssel is ellenőrizni akartuk a vizsgálati eredményeket, és megállapítottuk, hogy a keménység a varratban, a hőhatásövezetben és az alapanyagban a megengedett 380 HV10 alatti (**4. táblázat**).



6. ábra. Szakítóvizsgálati próbatestek

4. Következtetések

A lemezélek vágás során nem minden esetben készülnek el pontosan, ezért a két lemez illesztésénél rés képződik, ami nem egyenletes. Emiatt mindenképpen fontos tudni azt, hogy mekkora hézag engedhető meg úgy, hogy a varrat még létrehozható maradjon hegesztőanyag hozzáadása nélküli lézersugaras hegesztéssel. Az elvégzett lézeres hegesztési kísérletek eredményei alapján kimondható, hogy a Trumpf TLF 5000 turbo típusú szén-dioxid-lézer alkalmazásával 4,5 kW teljesítmény, 3000 mm/min hegesztési sebesség, 0 mm fókusztolás, 0,1 mm hézag, míg 4,5 kW teljesítmény, 2000 mm/min hegesztési sebesség, +5 mm fókusztolás esetén 0,27 mm hézag hegeszthető át elfogadható varratminőséggel.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras Technológiák I.*, 1. kiadás. Edutus Főiskola, Budapest, 2012.
- [2] Almási G., Erdélyi M., Fülöp József A., Hebling J., Horváth Z., Kovács Attila P., Rác B., Smausz Kolumbán T.: *Lézerfizika*. Elektronikus tananyag, (2013)
<http://titan.physx.u-szeged.hu/~bubo/Lezerfizika/book.html#id296435> (letöltve: 2023. 09. 30.)
- [3] Markovits T.: *Korszerű lézersugaras technológiák*. Akadémiai Kiadó, 2018.
- [4] R. Crafer, Peter J. Oakley: *Laser processing in Manufacturing*. Springer Science & Business Media, 1992. 292.
- [5] IIW VI-1338r1-2022 Laser welding terms for ISO/TR 25901-5 (2022)
- [6] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Műszaki Tudományos Füzetek, 4. 2007.
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [7] Halász G.: *Lézer hibrid hegesztés*. 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010.
- [8] Xinmin Dong, Guofang Wang, Mohammad Ghaderi: *Experimental investigation of the effect of laser parameters on the weld bead shape and temperature distribution during dissimilar laser welding of stainless steel 308 and carbon steel St 37*. Infrared Physics & Technology, 116. (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103774>.
- [9] Kovacs, T.: *Laser welding process specification base on welding theories*. Procedia Manufacturing, 22. (2018), 147–153.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.023>.
- [10] Dobránszky, J., Lőrinc, Zs., Gyimesi, F., Szigethy, A., Bitay, E.: *Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints*. In: 8th European Stainless Steel and Duplex Stainless Steel Conference, Graz, Austria, April 28-30, 2015. 138–147.