



A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének hatása kézi lézeres hegesztés esetén

The Effects of the Laser Pulse Duty and the Wobble in Case of Manual Laser Welding

Simon Virág,¹ Varbai Balázs,² Puskás Zsolt³

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, simon.virag240@gmail.com

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, varbai.balazs@gpk.bme.hu

³ Exasol Kft. Rétság, Magyarország, puskas@exasol.hu

Abstract

In our research we investigated the effects of the laser pulse duty and the wobble on the weld geometry in pulsed mode manual laser welding. Our experiments showed that, for the parameters studied, complete fusion can be achieved without laser wobbling at 500 W power for a material grade of 1.4301 and a wall thickness of 1.4 mm. Increasing the laser wobble amplitude led to an increase in weld width and a decrease in weld depth and weld area. Increasing the pulse duty also increased the weld width, weld depth and weld area. Without laser wobbling, a weld with an area of 1.1 mm² was produced when the pulse duty was set to 70%, while a weld with an area of 1.6 mm² was produced when the pulse duty was set to 100%, so that the area of the weld welded with a pulse duty of 70% was approximately 70% of the area of the weld welded with a pulse duty of 100%.

Keywords: manual laser welding, pulsed laser, pulse duty, laser wobble, weld geometry.

Összefoglalás

Kutatómunkánk során a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk impulzusos üzemmódú kézi lézeres hegesztés esetén. Kísérleteink alapján kiderült, hogy a vizsgált paraméterek mellett a lézernyaláb lengetése nélküli esetben érhető el teljes átolvadás 500 W teljesítménnyel 1.4301 anyagminőség és 1,4 mm falvastagság esetén. A lézernyaláb-lengetési amplitúdó növelése a varratszélesség növekedéséhez, valamint a teljes varratvastagság és a varratterület csökkenéséhez vezetett. A kitöltési tényező növelésével nőtt a varratszélesség, a teljes varratvastagság és a varratterület is. A lézernyaláb lengetése nélkül, 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,1 mm² területű varrat, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,6 mm² területű varrat keletkezett, tehát a 70%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területe jó közelítéssel 70%-a lett a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területének.

Kulcsszavak: kézi lézeres hegesztés, impulzusos lézer, kitöltési tényező, lézernyaláb-lengetés, varratgeometria.

1. Bevezetés

A lézeres hegesztés gépesített változatát széleskörűen alkalmazzák az iparban, hiszen számos előnnyel bír [1]. A kis területre fókuszált, erősen koncentrált lézernyaláb igen csekély hőhatás-vezetést hoz létre, és a hagyományos ömlesztőhe-

gesztési eljárásokhoz képest kis hőbevitelt eredményez, minimálisra csökkentve a munkadarab belső feszültségek általi deformációját, vetemelését [2, 3]. A lézeres hegesztés további előnye, hogy nagy feldolgozási sebességet és ezáltal nagy termelékenységet kínál [4]. Egyre elterjedtebb-

bé válnak az elmúlt évek során piacra bocsátott kézi lézeres hegesztőberendezések is, Magyarországon is egyre több cég forgalmaz és használ ilyen berendezéseket. A könnyű hegesztőpisztoly és munkakábel, valamint kis méretű, mobilis lézeroszcillátor által biztosított felhasználóbarát kezelhetőség egyre népszerűbbé teszi ezeket a hegesztőgépeket [5]. Az azonban elmondható, hogy újszerű volta miatt viszonylag kevés tapasztalat és kutatási eredmény áll rendelkezésre ezzel az eljárásváltozattal kapcsolatban a régebbi, hagyományos ömlesztőhegesztési eljárásokhoz képest.

Jelen kutatásunkban a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk ausztenites rozsdamentes acél kézi lézeres hegesztése esetén.

2. Hegesztési kísérletek és értékelésük

Kísérletsorozatunk 12 db hernyóvarratból állt. A kísérleti varratokat 1,4 mm falvastagságú, 34 mm külső átmérőjű, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekre készítettük el kézi lézeres hegesztéssel, hozaganyagot nem alkalmaztunk.

A varratok elkészítése során a kézi lézeres hegesztőpisztolyt a stabilitását biztosítandó készülékbe fogtuk be, így minimalizálva az emberi kéz bizonytalanságából eredő hibákat. Az egyenletes haladási sebességet úgy biztosítottuk, hogy a munkadarabot forgató berendezéssel forgattuk.

Az alapanyag EN 10088-1:2014 szabvány szerinti százalékos kémiai összetétele az **1. táblázat**ban látható.

1. táblázat. Az 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél százalékos kémiai összetétele [6]

C	Si	Mn	P	S
≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015
N	Cr	Ni	Fe	
≤0,11	17,5–19,5	8,0–10,5	mar.	

A kísérleti varratokat az amerikai IPG Photonics Corporation nevű cég által gyártott, LightWELD XC típusú, optikai szál, kézi lézeres hegesztőgéppel készítettük el. A hegesztőgép maximálisan 1500 W teljesítményű és 1080 nm hullámhosszú monokróm, koherens és kis divergenciájú lézernyaláb előállítására képes. Modulált, azaz impulzusos üzemmód esetén egy online, számítógépről elérhető kezelőfelület biztosít lehetőséget a lézerteljesítmény, a lézernyaláb-lengetési amplitúdó és frekvencia, az impulzusfrekvencia, valamint

a kitöltési tényező beállítására. Az impulzusos üzemmódban az impulzusfrekvencia a lézeroszcillátor által másodpercenként leadott impulzusok számát jelenti, a kitöltési tényező pedig egy impulzus hosszának és adott impulzus kezdetétől a következő impulzus kezdetéig eltelt időnek az arányát fejezi ki százalékos formában. A haladási sebesség az előzetes kísérleteink alapján 80 cm/min (v), a lézerteljesítmény pedig 500 W (P) volt. A bevitt energiát a következő képlettel számoltuk:

$$E = \frac{P(kW)}{v\left(\frac{mm}{s}\right)} = \frac{0,5}{13,33} = 0,0375 \frac{kJ}{mm} \quad (1)$$

Védőgázként 4,5 tisztaságú nitrogént használtunk 18 l/min térfogatárammal. A kitöltési tényezőt 70% és 100% között 10%-onként változtattuk, a lézernyaláb-lengetési amplitúdót 0 mm (ez tehát a lengetés nélküli eset) és 2 mm között állítottuk. Az impulzusfrekvencia és a lézernyaláb-lengetés frekvenciája az 1 mm-es és a 2 mm-es esetben egyaránt 200 Hz volt. A lézernyaláb lengetése a hegesztőpisztolyon belül történik, a lézernyaláb optikai úton történő oszcilláló mozgásával [7].

A hegesztési kísérletek végeztével a próbatestekből hagyományos módszerrel metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A varratalakot maratás segítségével hívtuk elő. A maratáshoz a következő összetételű Adler-marószert használtuk:

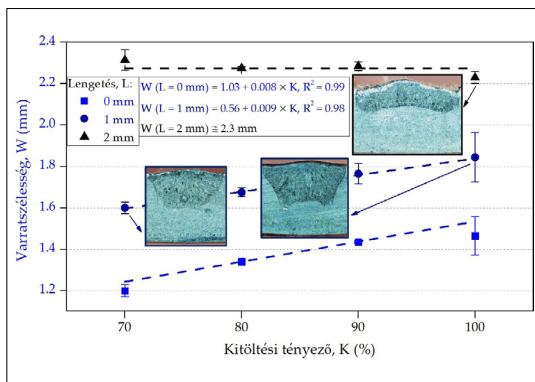
- 9 g réz-ammónium-klorid;
- 150 ml sósav;
- 45 g vas(III)-klorid 6-hidrát;
- 75 ml desztillált víz.

A mintákat 4–5 másodpercig szobahőmérsékleten maratva sikeresen láthatóvá tettük a varratok alakját, melyeket Olympus SZX 16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltunk. A varratokról fényképeket készítettünk, melyeken lemértük a kiértékeléshez szükséges varratszélesség, teljes varratvastagság és varratterület értékeket.

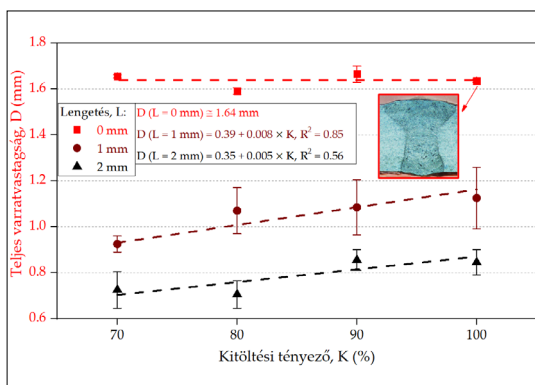
3. Eredmények és kiértékelésük

Az **1. ábra** a kialakuló varrat szélességének alakulását szemlélteti a kitöltési tényező és a lézernyaláb-lengetési amplitúdó függvényében. Megfigyelhető, hogy a 2 mm-es lengetéssel készített varratok szélessége közel állandó lett, míg az 1 mm-es lengetés esetén és a lengetés nélküli esetben a kitöltési tényező növelésével közel lineárisan nőtt a varratszélesség. A lengetési amplitúdó növelése a varratszélesség növekedését eredményezte.

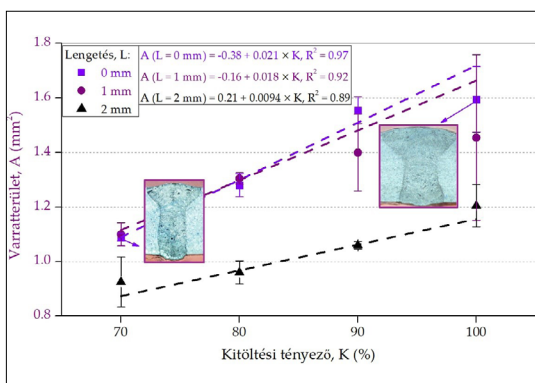
A **2. ábrán** a teljes varratvastagság alakulása látható. Megállapítható, hogy a teljes varratvastagság 2 mm-es és 1 mm-es amplitúdójú lengetés



1. ábra. Varratszélesség alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E = 0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén



2. ábra. Teljes varratvastagság alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E = 0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén



3. ábra. Varratterület alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E = 0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén

esetén is közel lineárisan növekszik a kitöltési tényező növelésével. Levonható továbbá a következtetés, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratok esetén a teljes varratvastagság jó közelítéssel azonos értéket vesz fel, mivel ezekben az esetekben teljes átolvadású varrat keletkezett.

A 3. ábra a varratrészlet alakulását mutatja a vizsgált paraméterek függvényében. A diagram alapján kimondható, hogy a varratok területe a lézernyaláb lengetése nélküli esetben, valamint az 1 mm-es és a 2 mm-es lengetés esetén is közel lineáris növekedést mutat a kitöltési tényező növelésével. Jól mutatja ezt a diagramra beillesztett két mikroszkópi kép. Ezen varratoknak a varratrészlet-értékei megfigyelve megállapítható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül és a 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,1 mm² területű varrat, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,6 mm² területű varrat keletkezett. Érdekes megfigyelni, hogy az 1,1 mm² az 1,6 mm²-nek jó közelítéssel a 70%-a, tehát a lézernyaláb lengetése nélkül, 100%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területének a 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területe a 70%-a.

4. Következtetések

Jelen kutatásunk során hernyóvarratokat készítettünk kézi lézeres hegesztéssel ausztenites rozsdamentes acél csövekre a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatásának vizsgálata céljából. Eredményeink alapján a következő megállapítások tehetők:

- a vizsgált paraméterek mellett csak a lézernyaláb lengetése nélkül volt elérhető teljes átolvadás;
- a lézernyaláb-lengetési amplitúdó növelése a varrat szélesség növekedését eredményezte, azonban a teljes varratvastagságot és a varratrészletet csökkentette;
- a kitöltési tényező növelésével a varrat mindhárom geometriai jellemzője növekedett;
- a lézernyaláb lengetése nélküli esetben a 70%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területe a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területének 70%-a lett.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka elvégzéséhez szükséges alapanyagot, berendezéseket és eszközöket az Exasol Kft. bocsátotta rendelkezésünkre, melyet ezúton is köszönünk. A szerző részvételét a konferencián a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány és a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012. 75.
- [2] Bitay E.: *Hegesztési alapismeretek.* Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2021. 58.
<https://doi.org/10.36242/mtf-16>
- [3] Klimpel A., Lisiecki A.: *Laser welding of butt joints of austenitic stainless steel AISI 321.* Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, 25/1. (2007) 1.
- [4] ESAB Kft., Lézersugaras hegesztés.
https://esab.com/hu/eur_hu/esab-university/blogs/what-is-laser-welding-and-how-does-the-technique-work/ (letöltve: 2025. február 25.).
- [5] Gapontsev V., Stukalin F., Pinard A., Shkurikhin O., Grapov Y., Markushov I.: *Handheld laser welding and cleaning system for typical metal fabrication using 1.5 kW fiber laser source.* Proceedings Volume 11981, Fiber Lasers XIX: Technology and Systems. (2022) 1.
<https://doi.org/10.1117/12.2616585>
- [6] EN 10088-1: Stainless steels. List of stainless steels, 2014.
- [7] Sanati S., Nabavi S. F., Esmaili R., Farshidianfar A., Dalir H.: *A Comprehensive Review of Laser Wobble Welding Processes in Metal Materials: Processing Parameters and Practical Applications.* Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 11/2. (2024) 1–37.
<https://doi.org/10.1007/s40516-024-00245-w>