

BUZA GÁBOR

A lézersugaras anyagmegmunkálás energiaviszonyai III.

Avagy: mire megy el az energia?

A cikksorozat első két részében a lézersugaras anyagmegmunkálás energiaviszonyainak áttekintéséhez szükséges fontosabb gondolatok szerepeltek. A harmadik, befejező részben a mélyvarratos lézersugaras hegesztés körülményeire alkalmazzuk az előző két rész gondolatmenetének megfontolásait. Láthatjuk, hogy a lézersugaras hegesztés eredményeinek metallográfiai módszerekkel és energiamentiség számításokkal történő elemzése olyan eredményekre is vezethet, melyek a hagyományos modellezési módszerek alkalmazásával csak nagy nehézségek árán és jelentős bizonytalansággal remélhetők.

Ahogy az előző két cikkben [1] és [2] áttekintettük, érzékelhető, hogy a lézersugaras technológiák valós energiaigényének meghatározása a veszteségek egyenkénti számbavételén és meghatározásán keresztül komoly nehézségekbe ütközik mind számítás, mind mérés útján történő próbálkozás esetén. Néhány esetben azonban van mód arra, hogy inverz módon értékeljük a lézersugaras kezelés energiaviszonyait. Anyagtudományi megközelítés alapján például lehetséges, hogy azt határozzuk meg mérés és számítás útján, mennyi energiára volt szükség az anyagban bekövetkezett, technológiailag megkívánt változáshoz.

Ez valójában a modellezés egy ritkán alkalmazott módszere, ami egyes esetekben a legcélravezetőbb mód a nehezen kibogozható összefüggések feltárására. Ilyen esetnek mutatkozik pl.: a hővezetési és a mélyvarratos hegesztés, vagy a lézersugaras felületedzés.

Az ilyen irányú megközelítés eredménye tájékoztató jellegű adatokkal szolgálhat többek között arról, milyen hatékonyságú az adott technológia, van-e elvi esélye a termelékenységek növelésének. A kapott eredményeket egyébként érdemes összevetni az azonos célú hagyományos

technológiák hatékonyságával, költségeivel, műszaki jellemzőivel. Alapos, több szempontot figyelembevevő értékelés alapján kell ugyanis eldönteni azt, hogy pl.: egy hegesztett kötet milyen technológiával érdemes (gazdaságos) létrehozni.

Az alábbiakban egy speciális, lézersugaras mélyvarratos tompahegesztés kísérletsorozatának eredményein keresztül mutatjuk be a lézersugár energiahasznosulás értékelési módszerének alkalmazását.

Termodinamikai számítások

A hegesztés során a technológiai cél a munkadarabok részleges megolvasztása az oldhatatlan kötés létrehozása érdekében. A megolvasztott térfogat nagysága a hegesztendő darab, ill. a hegesztés geometriai jellemzőitől, a hegesztendő darabok anyagától és a technológiai adottságoztól, kötöttségektől függ. Általában kedvező, ha a hegesztendő anyagnak csak kis térfogatát olvasztjuk meg, vagyis a munkadarabokkal fajlagosan (pl.: a varrat hosszúságára vonatkoztatva) kis mennyi-

változások mértéke csökkenthető. Ebben a tekintetben általános vélekedés, hogy a koncentrált energiabevitelű technológiák (pl.: elektronsugaras vagy lézersugaras) kedvezőbbek a hagyományosoknál.

Meg kell jegyezni, hogy a varrat térfogatának minimalizálása nem lehet minden esetben cél. Ennek belátása érdekében végezzünk vakvarratos és tompavarratos lézersugaras hegesztési kísérleteket. A kísérletek előtt tekintsük át, mi az, amit mérni és amit számolni akarunk.

Az előző részekben ([1] és [2]) bemutatott szemlélet szerint, hegesztés esetében, a varrat túlhevítés nélküli megolvasztásához szükséges energia a hasznosult energia. Több energia közlése „fölösleges”, amennyire lehetséges ennek mértékét csökkenteni kell. Azzal persze tisztában kell lennünk, hogy azt az ideális állapotot, amikor „fölösleges” energiát nem közlünk az anyaggal, jól ismert fizikai jelenségek (hőszugárzás, hővezetés stb.) miatt nem tudjuk megvalósítani. A célunk ennek tudatában mégis az, hogy a hegesztésre fordított energia többsége az olvadék létrehozására fordítódjék. Ez azt jelenti, hogy tiszta vas esetén a hasznosult energia számításához a szobahőmérséklettről az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulásig hevítéshez, az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakuláshoz, az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulástól a $\gamma \rightarrow \delta$ fázisátalakulásig hevítéshez, a $\gamma \rightarrow \delta$ fázisátalakuláshoz, $\gamma \rightarrow \delta$ fázisátalakulástól az olvadáspontig hevítéshez, valamint az olvasztáshoz szükséges energia összegét (Q_{olv}) kell meghatározni.

$$Q_{olv} = \int_{T=293}^{T=T_{\alpha \rightarrow \gamma}} c_{pa} dT + \Delta H_{\alpha \rightarrow \gamma} + \int_{T=T_{\alpha \rightarrow \gamma}}^{T=T_{\gamma \rightarrow \delta}} c_{p\gamma} dT + \Delta H_{\gamma \rightarrow \delta} + \int_{T=T_{\gamma \rightarrow \delta}}^{T=T_{olv}} c_{p\gamma} dT + \Delta H_{olv} \quad (1)$$

Dr. Buza Gábor szakmai életrajzát lapunk 2010. évi 2. számában közzeltük.

szerű energiát közlünk, mert így a vetemelés és a nem kívánatos anyagszerkezeti

ahol: $T_{\alpha \rightarrow \gamma}$ a vas $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulásának

$T_{\gamma \rightarrow \delta}$	határhőmérséklete, K
T_{olv}	a vas $\gamma \rightarrow \delta$ fázisátalakulásának határhőmérséklete, K
$c_{p\alpha}$	a vas olvadáspontja, K
$c_{p\gamma}$	az α -ferrit állandó nyomáson érvényes fajhőjének hőmérséklet-függvénye, kJ/kgK
$c_{p\delta}$	az ausztenit állandó nyomáson érvényes fajhőjének hőmérséklet-függvénye, kJ/kgK
$\Delta H_{\alpha \rightarrow \gamma}$	a vas $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulásához szükséges hőmennyiség, kJ/kg
$\Delta H_{\alpha \rightarrow \delta}$	a vas $\alpha \rightarrow \delta$ fázisátalakulásához szükséges hőmennyiség, kJ/kg
ΔH_{olv}	a vas olvadáshője, kJ/kg

A hatásfok, vagyis az η_h hegesztési teljesítményhasznosulás mértéke a technológiai paraméterek, a mért varratgeometriai jellemzők és az anyagállandók ismeretében számítható:

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_0} \cdot 100 = \frac{A \cdot v \cdot \rho \cdot Q_{olv} \cdot 100}{1000 \cdot 60 \cdot P_0} \quad (2)$$

ahol:

P_h	hasznosult (olvasztásra fordított) teljesítmény, kW
P_0	a lézersugár teljesítménye, kW
A	a varrat (olvadék) keresztmetszete, cm^2
v	előtolási (hegesztési) sebesség, cm/perc
ρ	sűrűség (acél = 7,8) kg/dm^3
Q_{olv}	fajlagos olvasztási energiaigény (vas = 1.296), kJ/kg [3]

A hatásfok számításához az A értékét kell mérni, ami például számítógépes képelemzés segítségével lehetséges.

Az energiaviszonyok részletesebb elemzésére további, mérésen és számításra alapuló becslésre van lehetőségünk, ha vizsgálódásunk során a varrat hőhatás-övezetét, annak nagyságát is figyelembe vesszük. Szerencsére a korszerű mérés-technika segítségével sok acélminőség esetén jól látható és mérhető a varrat hőhatás-övezetének területe is a maratott metallográfiai csiszolaton.

Az ilyen összetett energiaviszonyok egyszerű becslése érdekében tételezzük fel, hogy a maratott metallográfiai képen látható alapanyag és hőhatás-övezet határának hőmérséklete a $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulás hőmérséklete volt (nem vesszük figyelembe az ausztenitesedés kinetikáját). A hő-

hatás-övezet varrat (olvadék) felőli felülete pedig az anyag olvadáspontjának hőmérsékletét érte el. Ebben az esetben nem vesszük figyelembe az úgynevezett kevert zóna (olvadék + szilárd) létét. Úgy vesszük, mintha a folyékony és a szilárd halmazállapotú rész határa nem a szokásos oszlopos vagy dendrites kristályokból állna, ami a kristályosodási határ felszínét erősen tagolttá tenné. Ez az egyszerűsítés azért nem jelent nagy pontatlanságot a lézersugaras hegesztés során, mert az intenzív hőközlés és olvadékaamlás miatt az olvadás hatására a front alakja valóban nem tagolt. A kristallitokat az olvadék egy front mentén olvasztja fel, mintegy átvágva azokat. A hőközlés megszűnésével az „átvágott” kristályok kezdenek növekedni az olvadék rovására, vagyis epitaxiális kristályosodás kezdődik. Ezért nem látszik a mikroszkópos képen tagoltnak a varrat határa, inkább a síkfrontos kristályosodásra jellemző alakúnak tűnik.

Ötvözetek esetén a fenti számításban persze az olvadáspontot általában a likvidusz hőmérsékletekkel kell helyettesíteni, hiszen a homogén alapanyag teljes megolvastásához el kell érni a likvidusz hőmérsékletet. A lézersugaras kezelések során érvényesülő nem egyensúlyi viszonyok és az olvadék intenzív áramlása miatt a koncentrációkülönbség hatása nem jut szerephez.

A hőhatás-övezetbe jutott energia nagyságának becslésekor közelítő adatként elfogadhatjuk, hogy a hőhatás-övezet alapanyag felőli felülete éppen annyi energiát kapott, amennyi a szobahőmérsékletéről az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás hőmérsékletére hevítéséhez és az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás energiaigényének fedezéséhez szükséges ($Q_{\alpha/\gamma} = 618$ kJ/kg) [3].

$$Q_{\alpha/\gamma} = \int_{T=293}^{T=T_{\alpha-\gamma}} c_{p\alpha} dT + \Delta H_{\alpha \rightarrow \gamma} \quad (3)$$

A hőhatás-övezet olvadék felőli oldala az anyag olvadáspontjára hevítéséhez szükséges energiát ($Q_{\delta/olv} = 1.049$ kJ/kg) [3] kellett hogy kapjon, természetesen az olvadáshő energiaigénye nélkül.

$$Q_{\delta/olv} = \int_{T=293}^{T=T_{\alpha-\gamma}} c_{p\alpha} dT + \Delta H_{\alpha \rightarrow \gamma} + \int_{T=T_{\alpha-\gamma}}^{T=T_{\gamma \rightarrow \delta}} c_{p\gamma} dT + \Delta H_{\gamma \rightarrow \delta} + \int_{T=T_{\gamma \rightarrow \delta}}^{T=T_{olv}} c_{p\delta} dT \quad (4)$$

Mivel a mélyvarratos lézersugaras hegesztés hőhatás-övezetének vastagsága

lényegesen kisebb (az alábbi példában < 1 mm) mint a hagyományosaké, ezért további egyszerűsítésre van lehetőségünk azáltal, hogy a hőhatás-övezet által felvett energia becsléséhez a két energia számtani középértékének ($Q_{\text{átlag}}$) és tömegének szorzatát használhatjuk.

$$Q_{\text{átlag}} = \frac{Q_{\alpha/\gamma} + Q_{\delta/olv}}{2} \quad (5)$$

Tudjuk tehát, hogy az olvadék létrehozásához legalább 1.296 kJ/kg, a hőhatás-övezet létrehozásához pedig 618 kJ/kg energiára van szükség. Érdekes azonban arra is gondolni, hogy a hőhatás-övezet létrehozás energiaigényének számításakor két szemlélettel élhetünk, ami egyben két végletet is jelent (ebből már sejtjük, a valóság a kettő között van). Az egyik véglet szerint a hőhatás-övezet létrejöttét a lézersugár közvetlenül és egyedül eredményezte (deus ex machina). A másik szerint a hőhatás-övezet térfogatának $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás hőmérsékletre hevítését a varrat hőtartalma fedezi, miközben az az olvadék állapotból a fázisátalakulás hőmérsékletére hűl. Mind a két esetben feltételezzük, hogy nincs sugárzásos és hőátadásos veszteség a darab felületén.

A fentiek tisztázása után néhány valós kísérlettel vizsgáljuk meg, milyen hatása van a technológiai paramétereknek a lézersugár hasznosulására a mélyvarratos lézersugaras hegesztés körülményei között. Tegyük ezt két megközelítésben:

1. Csak az olvadék létrehozásához szükséges hőmennyiséget tekintjük hasznosultnak;
2. Figyelembe vesszük a hőhatás-övezet kialakulásának energiaigényét is.

A mélyvarratos hegesztési kísérletek anyaga 6 mm vastag, melegen hengerelt, kis karbontartalmú, mikroötvözött minőségű acéllemez volt: az ISD Dunaferr Zrt. szerinti S355 MC típusú acél vegyi összetétele a következő (1. táblázat).

Mérési adatok

A vakvarratos lézersugaras hegesztési

kísérleteket 8 kW fénytelsítményű, $k = 0,97$ sugárminőségű, Rofin-Sinar gyárt-

1. táblázat. A vizsgált S355 MC acéllemez vegyi összetétele

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Al%	Cr%	Nb%
0,064	0,574	0,203	0,012	0,008	0,058	0,12	0,015

2. táblázat. Mély-, ill. vakvarratos kísérlet sorozat paraméterkombinációi 6 mm vastag acéllemezen

Sor-szám	Hegesztési sebesség, m/perc	Fókusz-helyzet, mm	Bifokalitás, mm
1	3,0	4,1	0,9
2	1,2	0,0	0,9
3	2,0	0,0	0,9
4	3,0	0,0	0,9
5	1,2	+2,0	0,9
6	2,0	+2,0	0,9
7	3,0	+2,0	0,9
8	1,2	-2,0	0,9
9	2,0	-2,0	0,9
10	3,0	-2,0	0,9
11	1,2	0,0	0,8
12	2,0	0,0	0,8
13	3,0	0,0	0,8
14	1,2	+2,0	0,8
15	2,0	+2,0	0,8
16	3,0	+2,0	0,8
17	1,2	-2,0	0,8
18	2,0	-2,0	0,8
19	3,0	-2,0	0,8
20	1,2	0,0	1,0
21	2,0	0,0	1,0
22	3,0	0,0	1,0
23	1,2	+2,0	1,0
24	2,0	+2,0	1,0
25	3,0	+2,0	1,0
26	1,2	-2,0	1,0
27	2,0	-2,0	1,0
28	3,0	-2,0	1,0

mányú (típus: DC 080) lézerberendezéssel végeztük. A hegesztőfej fókusz távolsága 250 mm. A fókuszáló parabolatükör osztott, két darabból áll. A két parabolatükördarab egymáshoz képest elmozdítható, így a 15 mm átmérőjű „nyers” sugárnyalóbot két pontba fókuszálja (bifókusz). A bifokalitás mértéke 0 és 1 mm között mikrométerek segítségével állítható. A hegesztési védőgáz He volt, a lemez fölött 10 l/perc, alatta 2 l/perc intenzitással, a lemez síkjával 45°-os szöget bezáró, 8 mm átmérőjű fúvókán keresztül. A védőgáz fúvásának iránya ellentétes a hegesztés irányával (hátrafelé irányított).

Az első hegesztési kísérlet sorozatban három technológiai paraméter hatását vizsgáltuk a varrat geometriájára: (v) a hegesztés sebességét, (f) a fókusz helyzetét

3. táblázat. Mély-, ill. vakvarratos kísérlet sorozat paraméterkombinációi 4 mm vastag acéllemezen

Sor-szám	Lézersug. telj., W	Hegesztési sebesség, m/perc	Fókusz-helyzet, mm	Bifokalitás, mm
1	7800	2	0	0,9
2	7800	3,5	0	0,9
3	7800	5	0	0,9
4	7800	2	2,5	0,9
5	7800	3,5	2,5	0,9
6	7800	5	2,5	0,9
7	7800	2	5	0,9
8	7800	3,5	5	0,9
9	7800	5	5	0,9
10	7000	2	0	0,9
11	7000	3,5	0	0,9
12	7000	5	0	0,9
13	7000	2	2,5	0,9
14	7000	3,5	2,5	0,9
15	7000	5	2,5	0,9
16	7000	2	5	0,9
17	7000	3,5	5	0,9
18	7000	5	5	0,9
19	6000	2	2	0,76
20	6000	3	2	0,76
21	6000	4	2	0,76
22	6000	2	3	0,76
23	6000	3	3	0,76
24	6000	4	3	0,76
25	6000	2	4	0,6
26	6000	3	4	0,6
27	6000	4	4	0,6
28	7800	2,8	5,1	0,9

(defókusz) és (b) a bifokalitás mértékét. A paraméterkombinációkat a 2. táblázat tartalmazza.

A másodikban az előzővel azonos acélminőségű, de 4 mm vastag lemez vakvarratos lézersugaras hegesztési kísérleteinek eredményét vizsgáltuk. Ebben az esetben a kapcsolódó technológiai műveletek lehetővé tették, hogy ne kelljen kihasználni a sugárforrás teljesítőképességét. Ezért ebben a kísérlet sorozatban egy új paraméter, a lézersugár teljesítményének hatását is vizsgálni lehetett a hegesztési varrat alakjára (3. táblázat).

A kísérlet sorozatokban a paraméterek megválasztása során nem volt cél a lemezek áthegesztése, annál inkább a ritkán alkalmazott, változtatható lézersugár bifokalitás varratgeometriára gyakorolt ha-

tásának értékelése. A varrat és a hőhatásövezet területi adatait a 28 db 1 m hosszú varrat elején, közepén és végén, összesen 84 keresztmetszeten vizsgáltuk.

Általános példaként két hegesztési vakvarratról készült metallográfiai képet mutatunk be (1. ábra). Az egyik esetben nem olvadt át az acéllemez, a másikban igen.

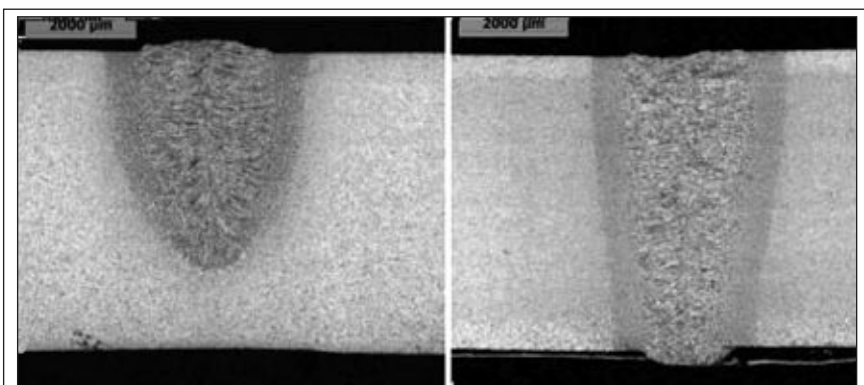
A kísérlet sorozatok mérési és számítási eredményeiből számos következtetés vonható le, melyek közül, a számítási eredmények részletezése nélkül, most csak néhányat emelünk ki. A vizsgált paramétertartományban

- a hegesztési varrat túlhevítés nélküli létrehozására a lézersugár teljesítményének átlagosan 38,25%-a fordítódott (min.: 15,8%, max.: 65,67%);
- a varrat túlhevítés nélküli megolvasztásához és a hőhatásövezet felhevítéséhez együttesen a lézersugár teljesítményének átlagosan 53,86%-ára volt szükség (min.: 22,15%, max.: 92,27%);
- a varrat túlhevítés nélküli megolvasztására és a hőhatásövezet felhevítésére fordítódott energiamennyiségek viszonya: varrat/hőhatásövezet = 71%/29% arányban alakult (a hőhatásövezetre fordított hányad min.: 21,5%, max.: 43,16%);
- a varrat túlhevítés nélküli megolvasztására a nagyobb hegesztési sebesség esetén fordítódik nagyobb energiahányad;
- a varrat túlhevítés nélküli megolvasztására a kisebb bifókusz távolság esetén fordítódik nagyobb energiahányad.

Meg kell jegyezni, hogy a kísérleti körülmények között meghatározott energiahasznosulás, ami a varrat túlhevítés nélküli megolvasztása szempontjából a legjobb eredményeket adja, nem eredményez minden esetben teljes átolvadási, vagyis gyakorlati szempontból indifferens. A 6 mm vastag lemez esetében a 2. ábra mutat erre példákat.

Ez is igazolja, hogy a műszaki feladat megoldásához a hasznosult energiának a mérésen és számításon alapuló meghatározása önmagában nem szolgáltatja az optimális lézersugaras hegesztési paramétereket, de az adatok kiértékelése számszerűsített iránymutatást ad a technológiafejlesztés folyamatában.

A 2. ábrán látható diagram alapján az a következtetést lehet levonni, hogy a vizsgálati körülmények között a varrat és

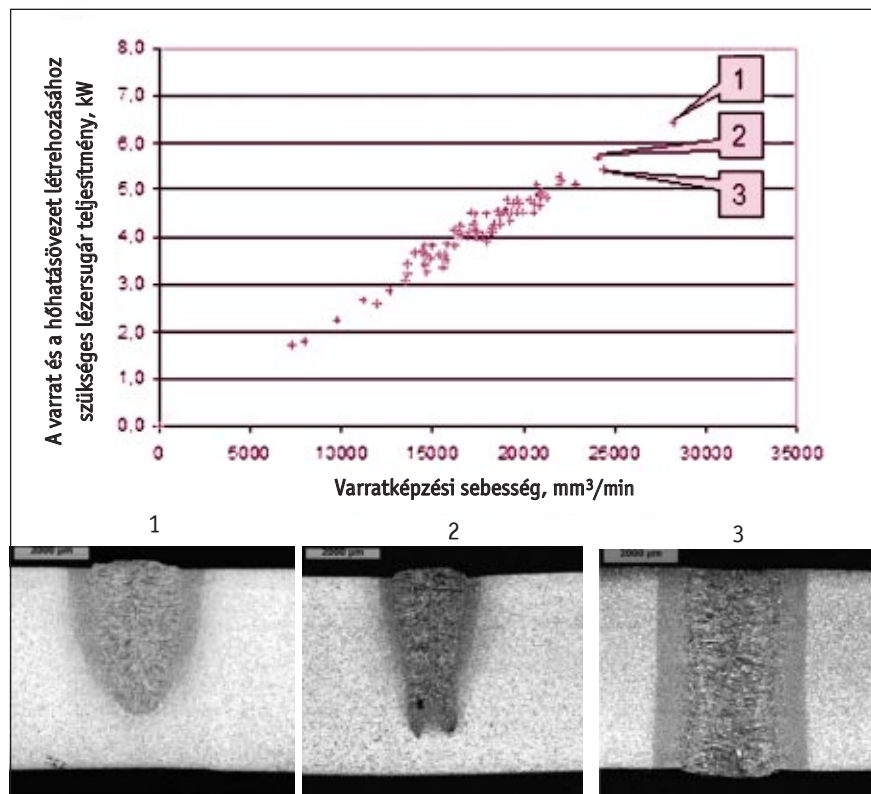


Olvadék területe:	8,510mm ²	Olvadék területe:	12,033 mm ²
Hőhatásövezet területe:	5,719mm ²	Hőhatásövezet területe:	9,382mm ²
Hegesztési teljesítmény:	28,220 cm ³ /perc	Hegesztési teljesítmény:	14,439 cm ³ /perc
Hegesztési sebesség:	3,0 m/perc	Hegesztési sebesség:	1,2 m/perc
Fókuszhelyzet:	-2,0 mm	Fókuszhelyzet:	+ 2,0 mm
Bifokálítás:	0,8 mm	Bifokálítás:	0,8 mm
Lézersugár teljesítménye:	7,8 kW	Lézersugár teljesítménye:	7,8 kW
Mintavétel helye:	varrat közepe	Mintavétel helye:	varrat vége

■ 1. ábra. Vakvarratos hegesztési kísérlet eredményéről készült metallográfiai csiszolatok

a hőhatásövezet nagysága között egy közel állandó viszony van. 84 hegesztési varrat adatait értékelve az tapasztaltó, hogy a hőhatásövezet létrehozására fordított energia a két rész (hőhatás + varrat) összegéhez viszonyítva átlagosan

28,8%. Ettől az értéktől az átlagos abszolút eltérés nagysága 2,81%. Ez jelentheti azt, hogy a hőhatásövezet létrejöttének energiaigényét a varrat hűlése során elvezetett energia jelentős mértékben befolyásolja, a kettő között



■ 2. ábra. A három legjobb varratképzési sebességhez tartozó varratgeometria

kapcsolat van. A varrat térfogatának növekedése maga után vonja a hőhatásövezet térfogatának növekedését. A feltart viszonyszám jellemzi a lézersugár minőségét, energiaeloszlását, a hegesztett anyag minőségét és a hegesztési technológiát egyaránt.

Megfontolások

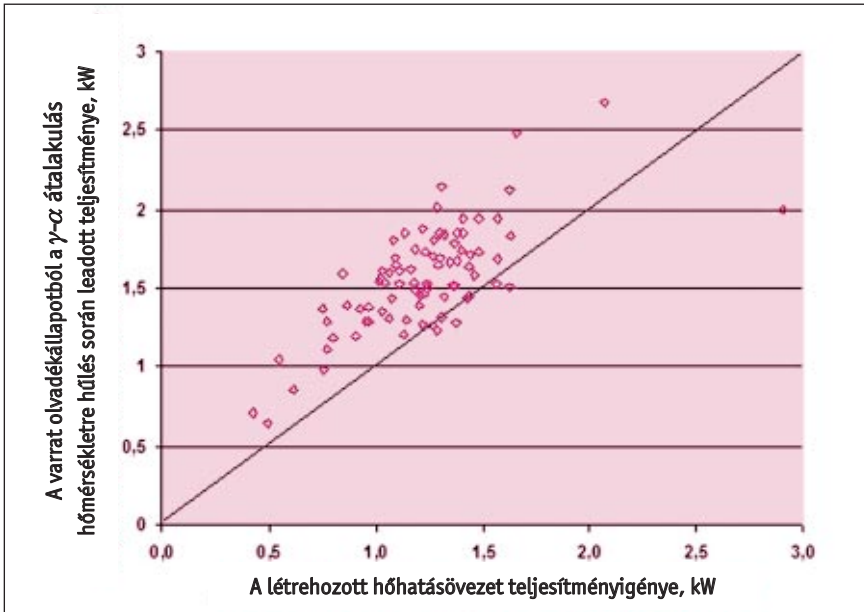
A 2. ábra diagramján ábrázolt, hasznosult lézersugár-teljesítmény adatok számítása az (1)-(5) egyenletek alapján történt. Ez azt jelenti, hogy a hegesztési varrat létrehozásához, vagyis a varrat térfogatának megfelelő mennyiségű acél megolvasztásához és a hőhatásövezet térfogatának megfelelő mennyiségű acél ausztenítéséhez szükséges teljesítmény összege szerepel a diagram függőleges tengelyén. Megfontolandó azonban, hogy az olvadék, amíg lehül a $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulás hőmérsékletére, a környezetét hevíti. Vagyis az olvadék hűlése maga is képes hőhatásövezetet létrehozni. Nem feltétlenül kell hozzá a lézersugár energiája.

Végezzünk egy gondolatkísérletet. Mekkora térfogatú anyagot képes auszteníteni az olvadék állapotú varrat, ha a $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulás hőmérsékletére hűlése során leadott energia csak a hőhatásövezet létrehozására fordítódik. Érdemes ezt a térfogatot összevetni a metallográfiai módszerrel mért hőhatásövezet nagyságával (3. ábra).

Meglepő eredményre jutottunk. A lézersugaras hegesztési varrat a hűlése során nagyobb hőhatásövezetet hozhatott volna létre, mint amekkorát a metallográfiai vizsgálatok során mérni lehetett. Ennek több oka is lehet. Ezek közül két, különböző szempontú megközelítés:

- A gyors hőmérsékletváltozás esetén érdemes lenne az ausztenitációs diagramokban összegzett ismereteket is figyelembe venni. Valószínű ugyanis, hogy nagyobb térfogatú anyag hevült az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás hőmérséklete fölé, mint amekkorá valóban ausztenitessé vált.
- A varrat nem csak a darabon belüli hővezetéssel adta le energiátartalmát a környezetének. Valószínű, hogy a sugárzásos és a hőátadásos hőveszteség is szerepet játszott a folyamatban.

A második kísérletsorozatban a lemezollóval vágott lemezek gyors, biztonságos, tompavarratos, hozaganyagmentes



■ 3. ábra. A mért és az olvadék hűléséből származó hatásövezet teljesítményigénye

hegesztése volt a végcél. Ebben az esetben már szerepet játszott a gépi ollóval vágott lemezek geometriája is. A hagyományos, egyfókuszos (monofókusz) lézersugár alkalmazása esetén nagy a veszélye annak, hogy a kis átmérőjű fókuszolt hibás hegesztést eredményez. Ezt szemléltetik a 4–6. ábrák.

A 4. ábrán kedvező geometriai viszonyok látszanak, mert ebben az esetben a két, 1,8 mm vastag lemez gépi ollóval vágott élének érintkezési vonalán van a lézersugár optikai tengelye. (A geometriai viszonyokat azért az 1,8 mm vastag lemezen mutatjuk be, mert az ideálistól eltérő viszonyok itt jobban látszanak.) Ha ez lenne a valóság, akkor a monofókusz alkalmazása kis kockázattal járna, mert a

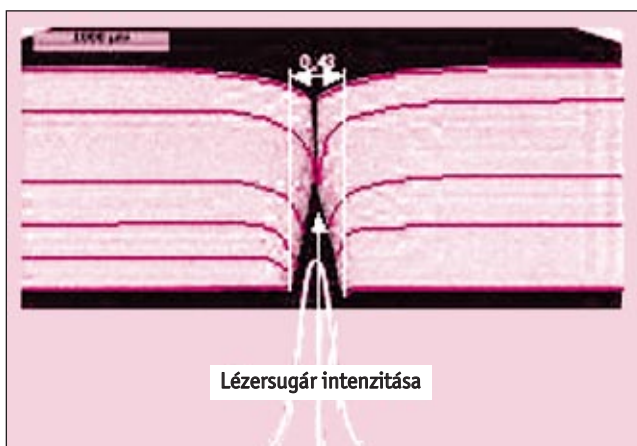
két lemezélet egyenlő mértékben hevítene a lézersugár.

Valós körülmények között a kockázatot ebben az esetben az jelenti, hogy a lemezeknek csak közvetlenül a vágott élre olvad meg (a fókuszolt átmérője kicsi). Ekkor ugyanis a kevés olvadék „ráfuthat” a lemezre, mert az acélt az olvadéka jól nedvesíti. Így a kevés olvadék miatt rés alakulhat ki, amin a lézersugár elnyelődés nélkül halad át (5. ábra). A lemezek hirtelen lecsökkent energiafelvétele következtében az olvadék megdermed, a továbbhaladó lézersugár ismét elnyelődik a lemezek összeillesztett vágott élében. Ennek a folyamatnak egy periodikusan ismétlődő varrat-lyuk-varrat-lyuk kép lesz az eredménye.

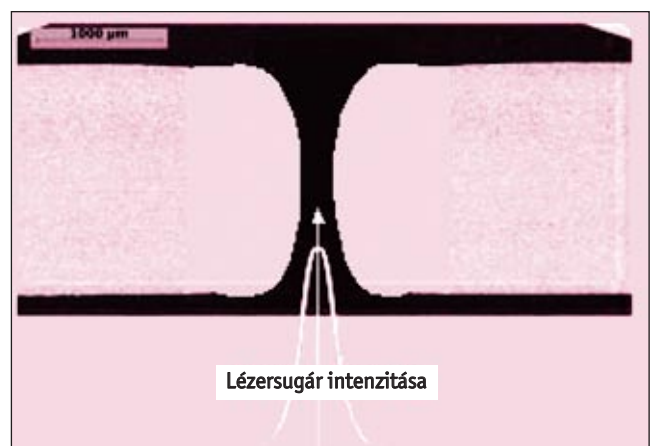
Az alkalmazott lézersugár fókuszoltátmérője (Rofin Sinar DC 080) 0,3 mm. Ez azt jelenti, hogy a kb. 1 m hosszú varrat mentén a lézersugár optikai tengelyének nem szabad 0,15 mm-nél nagyobb mértékben eltérnie a lemezek érintkezési vonalától, mert akkor a 6. ábrán látható hibás hegesztési eredményre jutunk.

A bizonytalan, esetről esetre változó geometriájú vágott felületek (pl.: a lemezolló élének kopása) miatt szükség van a bifókuszos lézersugárra, hiszen nagy biztonsággal csak így érhető el az, hogy a létrehozandó varrat teljes hosszában megolvadjon mind a két lemez éle (7. ábra). A bifokális mértékének (az egymás mellett lévő két fókuszpont közötti távolság) növelésével nő a folyamatos hegesztési varrat létrehozásának biztonsága, de egyben a varrat keresztmetszete is, ami növekvő fajlagos lézersugár energiaigényt jelent. A fajlagosság alatt ebben az esetben az egységnyi hosszúságú varrat létrehozásához szükséges energiaigényt kell érteni. Mindezekből következik, hogy a bifokális mértékének is van optimuma.

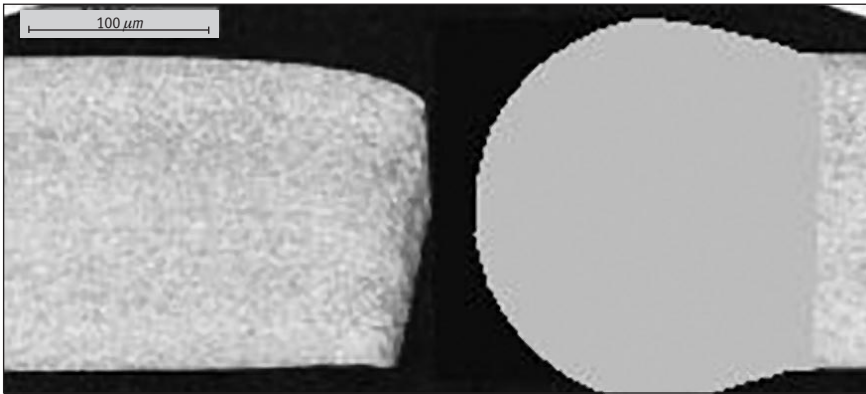
A hegesztési technológia megítélése során a varrat jóságán túl egyéb szempontokat is szükséges értékelni, ha a gazdaságos technológia kidolgozása a cél. Ilyen pl.: az időegység alatt létrehozott varrat térfogata, amit varratképzési sebességként, hegesztési teljesítményként, vagy a lézersugár olvasztási teljesítményeként is értékelhetünk. A kísérletek során ennek vizsgálata kapcsán kitűnt, hogy a hegesztési varrat létrehozására fordított teljesítmény növekedése a hegesztési teljesítménnyel lineáris kapcsolatban van. Ezt láttuk a 2. ábrán is. A diagramon szemlél-



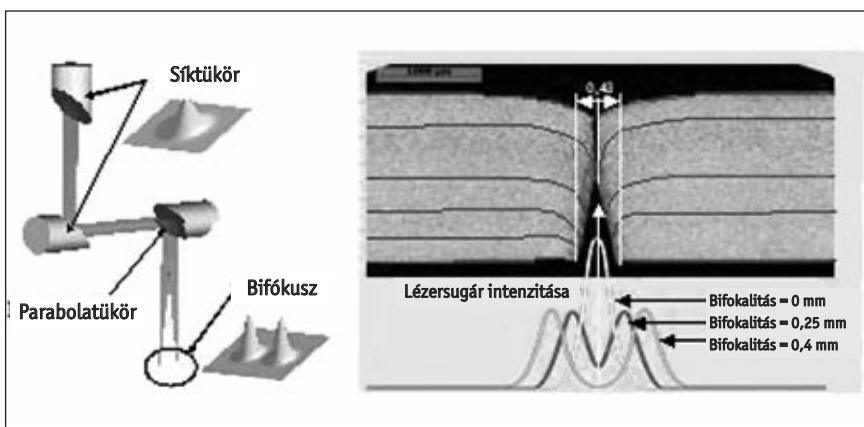
■ 4. ábra. A monofókuszú lézersugár-intenzitás eloszlása az összehegesztendő lemezvégekhez képest



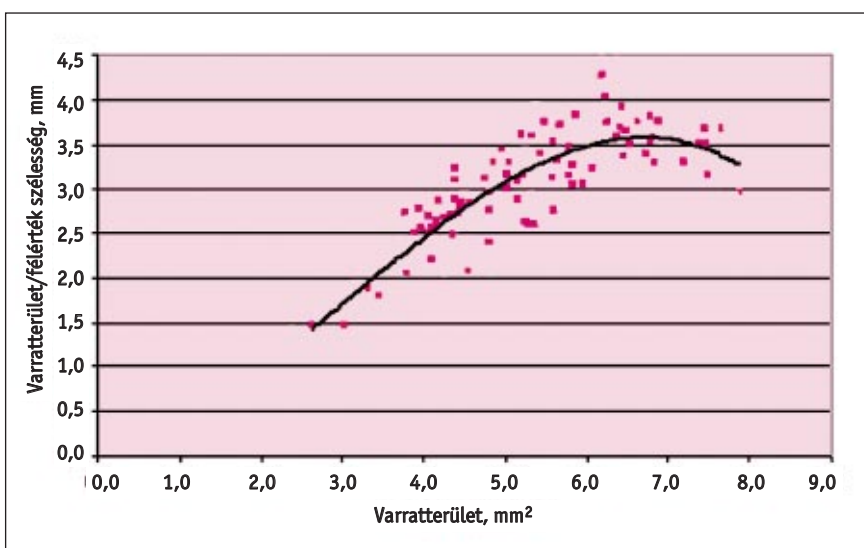
■ 5. ábra. A lemezszelek részleges megolvadásának és a határfelületi energiának következtében kialakuló hegesztési hiba



■ **6. ábra.** Az ideális helyzettől az egyik lemez irányába $>0,15$ mm-rel eltért lézernyílás hatására kialakuló hegesztési hiba



■ **7. ábra.** A bifókuszú lézernyílás intenzitás eloszlása az összehegesztendő lemezvégekhez képest



■ **8. ábra.** A varrat karcsúságának mértéke a varratterület függvényében

tetett kapcsolat azért is érdekes, mert minden adathoz 7,8 kW lézernyílás-teljesítmény tartozik. Csak a hegesztési sebesség (1,2–3 m/perc), a bifokális mértéke (-2 – $+4,1$ mm) és a defókusz (0,8 – 1,0 mm) értékek különbözőek.

Az energia és a geometriai viszonyok értékelése során olyan összefüggéseket is sikerült feltárni, melyek nem lineárisak (8. ábra). A mélyvarratos lézernyílás hegesztés egyik jellemzője, hogy a varrat mélysége nagyobb, mint a szélessége. A varrat szélességét természetesen több helyen is lehet mérni, értékelni. Ebben az esetben a mérés helye legyen a varrat mélységének felénél. A varrat karcsúságát értelmezhetjük a varrat keresztmetszete és szélessége hányadosaként, így mértékegysége a hosszúság mértékegysége lesz. A varrat karcsúságát a varrat területének függvényében ábrázolva (8. ábra) azt tapasztaljuk, hogy a kb. 6 mm²-es varrat-keresztmetszet esetén a legkedvezőbb a varrat geometriája.

Összefoglalás

A három részből álló cikksorozattal az volt a célunk, hogy átfogó képet adjunk a nagyteljesítményű lézernyílás anyagmegmunkálás energiaközpontú szemléletéről. Azt bizonyosan minden olvasó érzi, hogy a három cikk terjedelme sem elegendő ahhoz, hogy valamennyi esetet (sugárforrások, anyagok, technológiák) értékelni lehessen. A lézernyílás alkalmazása egyébként sem tekinthető lezárt fejezetnek a technológiák sorában. Nagyon valószínű, hogy gazdasági szempontok és megfontolások összetett értékelése szemléletváltozáshoz fog vezetni a nagy teljesítménysűrűségű technológiák alkalmazása terén. A cikksorozat a szemlélet alakításához kívánt adalékként szolgál.

Irodalomjegyzék

- [1] Buza G.: A lézernyílás anyagmegmunkálás energiaviszonyai I., Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat, 2009/142/6 p.: 31-37.
- [2] Buza G.: A lézernyílás anyagmegmunkálás energiaviszonyai II., Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat, 2010/143/2 p.: 33-39.
- [3] I. Barin: Thermochemical Properties of Pure Substances, VCh, 1993, in 2 parts