

A fókuszhelyzet szerepe erősen reflektáló anyag egyimpulzusos, lézersugaras fúrásakor

The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials

Meszlényi György,¹ Bitay Enikő²

¹Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, meszlényi.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu

²Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, ebitay@ms.sapientia.ro

Abstract

The laser processing of materials which are highly reflective at laser wavelengths is problematic. We have to take into account that only a small part of the energy is absorbed, the main part being reflected. In this article we examine the laser processing of highly reflective copper and silver at 1070 nm wavelength. In laser drilling of printed circuit boards it is necessary to drill copper layer as well. In highly reflecting materials we can drill smaller holes because of the low energy efficiency. Naturally in single pulse laser drilling the focus position plays a key role: at the focal spot of the laser beam smaller diameter holes are produced, further from the focal spot, higher diameter holes are produced.

Keywords: *laser drilling, focal position, highly reflecting materials.*

Összefoglalás

A megmunkáló lézer hullámhosszán erősen reflektáló anyagok megmunkálásakor tekintetbe kell venni, hogy az energia csak kis része hasznosul, a többi visszaverődik. Jelen esetben az 1070 nm-es hullámhosszon a réz és az ezüst számít ilyen anyagnak. A nyomtatott áramkört lemezek fúrásakor a rézréteget is át kell fúrni. Sokszor előnyös, hogy az erősen reflektáló anyagba kisebb furatokat lehet készíteni éppen a rossz energiahasznosítás miatt. Természetesen az egyimpulzusos, lézersugaras fúrásakor a fókuszpozíciónak is nagy szerepe van: a fókuszált lézernyaláb fókuszában lehet a legkisebb, tőle távolodva nagyobb átmérőjű furatokat készíteni.

Kulcsszavak: *lézersugaras fúrás, fókuszpozíció, erősen reflektáló anyagok.*

1. Bevezetés

A lézersugaras fúrás szakirodalmá megkülönböztet egyimpulzusos fúrást, illetve ütve fúrást, ahol a lézer egy furat kialakításához több impulzust használ, továbbá a nagyobb furatok létrehozásához használt trepanációs (lépcsős) fúrást és a bolygófurást [1]. Ebben a cikkben az egyimpulzusos fúrást fogjuk vizsgálni. Nyomtatott áramkört lemezek lézersugaras fúrásánál a réz vezetőréteget is át kell fúrni [2]. Cikkünkben is réz- és ezüstfólia fúrását vizsgáljuk.

2. A megmunkáló lézer tulajdonságai

A kísérletekhez használt lézer IPG-gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú szállézer volt, amelynek műszaki adatait az 1. táblázat tartalmazza.

Megtévesztő a 150 W átlagteljesítmény, mert ha egy impulzus teljesítményét kiszámítjuk, az impulzusenergiát elosztva az impulzusidővel, akkor meglepően nagy értéket kapunk: $P_p = E_p / t_p = 15 \text{ J} / 0,01 \text{ s} = 1500 \text{ W}$ impulzusteljesítmény adódik ezekből az értékekből. Ez azt is jelenti, hogy az emberi szem számára egy 150 W átlagteljesítményű impulzuslézer veszélyesebb, mint egy

1. táblázat. Az IPG gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú, itterbium-YAG szállézer műszaki adatai

Hullámhossz	1070 nm
Maximális átlagteljesítmény	150 W
Maximális impulzusteljesítmény	1500 W
Maximális impulzusenergia	15 J
Impulzsidő	0,05–50 ms
Impulzfrekvencia	10–50 kHz
M ² faktor	1,05

folyamatos üzemű 150 W-os lézer, ezért a szemet az adott hullámhosszon védő és megfelelő optikai sűrűségű védőszemüveggel kell védeni.

3. A fókuszált lézernyaláb meghatározó változóinak elemzése

Lézersugaras, egyimpulzusos fúrásnál fontos szerep jut a megmunkálólézernak, ezen belül a fókuszált nyaláb keresztmetszeti jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek, mert a fókuszált nyaláb az az érintésmentesen dolgozó szerszám, mely energiaátadás útján a megmunkálást végzi.

Az optikai szálból kilépő lézernyaláb átmérője 14 mikrométer (d_1). A kilépő nyalábot tágító és párhuzamosító kollimátorlencse fókusz távolsága 50 mm (f_1). A párhuzamos lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága 50 mm (f_2). A nyalábtágító állása 1-es volt, így a nyalábtágítási faktor (B_e) szorzótényezője 1. Ezen adatok alapján kiszámolható a fókuszált lézernyaláb fókuszfoltátmérője (d_2) az alábbi képlettel [3]:

$$d_2 = \frac{4\lambda M^2 f_2}{d_3 \pi} \quad (1)$$

Az egyenletből 14 mikrométer adódik a fókuszált lézernyaláb fókuszátmérőjének. Ez, összehasonlítva a korábbi cikkünkben [4] használt Nd:YAG lézer 81 mikrométeres, nyalábtágítás nélküli foltméretével, rendkívül kis érték, ami azt jelenti, hogy a lézer energiája nagyon kis területre fókuszálható, tehát nagy energiasűrűség érhető el. Vágásnál ez kisebb vágási rést és vastagabb vágható anyagot jelent. Az eltérés a két lézer különböző működési elvűből fakad, ami a nyalábminőségi tényezőt befolyásolja. Míg a korábbi cikkünkben használt Nd:YAG lézer nyalábminőségi tényezője $M^2 = 3-5$, addig a szállézeré 1,05. Miért fontosak ezek az értékek?

A fókuszált lézernyaláb foltátmérőjének másik képletéből (2) következik, hogy minél kisebb az M^2 tényező értéke, annál kisebb területre fókuszálható a lézer energiája [5].

$$d_2 = \frac{d_1 f_2}{f_1 B_e} \quad (2)$$

A képletben szereplő d_3 a párhuzamos lézernyaláb fókuszáló lencse előtti átmérője, amely a többi tényező ismeretében számítható, 5,11 mm-nek adódik. A lézer hullámhosszának (λ) szerepe: ha itterbium-szállézer ($\lambda = 1,070$ mikrométer) használunk CO₂ lézer ($\lambda = 10,600$ mikrométer) helyett, akkor 10-szer kisebb foltra lehet fókuszálni a lézernyalábot.

A Rayleigh-hossz a nyalábtérjedés irányában a fókuszsíktól mért az a hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádusza gyök kettő-szeresére nő, ezért a felületegységre jutó impulzusenergia a felére esik vissza a fókuszfoltban számíthatóhoz képest. Általában a Rayleigh-hossz kétszeresen belül tekintik fókuszban levőnek a nyalábot. Képlete nagyon hasonló a lézerfoltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszáló lencse fókusz távolsága és a lencse előtti nyalábtátmérő a négyzetben szerepel (3) [6].

$$Z_r = \frac{4\lambda M^2 f_2^2}{d_3^2 \pi} \quad (3)$$

A képletbe az eddig megadott adatokat behelyettesítve 137 mikrométer adódik. Természetesen d_2 és Z_r értéke tájékoztató jellegű, egyes szakirodalmak például kihagyják M^2 faktort a képletből, ami elég furcsa. Ha a nyalábtágító egy zoomos rendszer, akkor a lencsehibák is ronthatnak a fókuszálhatóságon.

A fenti két jellemző értékéből az derül ki, hogy nem biztos, hogy érdemes nyalábtágítót használni, mert a tágítás nélküli 14 mikrométeres foltátmérő elég kis érték, tágítással d_3 értékét növelve a fókuszfolt mérete tovább csökken, de Z_r értéke is csökken, tehát a fókuszfolttól a lézersugár terjedésének irányában jobban széttart a nyaláb.

A fentiekben kiszámolt d_2 és Z_r értékek csak a geometriai jellemzőkből származnak, míg azt, hogy a valóságban mekkora térfogatú anyag olvasztható meg egy lézerimpulussal, vagyis egy impulzus periódusideje alatt átadott energiával, azt két tényező befolyásolja erősen. Az első az, hogy mekkora a lézerimpulzus teljesítménye, amelyet erre a foltméretre koncentrálunk, ez jelen esetben akár 1500 watt is lehet. A másik tényező a megmunkálandó anyag releváns fizikai jellemzőinek összessége: sűrűség, olvadáspont,

fajhő, olvadáshő, reflexiós tényező a lézer hullámhosszán; ezekre a 4. pontban térünk ki. A lézerberendezést üzemeltető Pulzor Művek tapasztalatai szerint például rozsdamentes acélt 1 mm vastagságig tud vágni a rendszer, rézötvezetek vágását 0,4 mm vastagságig [7]; ám ezek a vastagságok túlmennek a kiszámított Rayleigh-hossz kétszeresén.

Az itterbium-szállézer és a munkadarab-mozgató szánokat a Pulzor Művek építette össze, és ugyanó készítette el a rendszer vezérlőprogramját, mely saját CAM-programmal generálja a CAD-fájlból a munkadarab elkészítéséhez szükséges mozgásokat leíró CNC-kódot.

4. A megmunkált anyagok tulajdonságai

Miért jelent nagy kihívást a lézersugárzás hullámhosszán erős reflexiót mutató anyagok fűrése? Az minden lézeres megmunkálásnál meghatározó jelentőségű, hogy az anyag felületére beeső sugárzás – és az általa szállított energia, illetve teljesítmény – egy része visszaverődik, másik része elnyelődik, míg egy harmadik része áteresztődik, tehát [8]:

$$P_1 = P_2 + P_3 + P_4 \tag{4}$$

Itt P_1 az összes, P_2 a visszavert, P_3 az elnyelt, P_4 az áteresztett energiából számítható teljesítményt jelöli. Tömbi anyagok megmunkálásánál elhanyagolható az áteresztett energia, tehát minél nagyobb energiahányad reflektálódik, annál kevesebb teljesítmény hasznosul. Ha $P_1 = 1$, akkor P_3 az abszorpció tényező (a), P_2 a reflexiós tényező (r) adott anyagra és adott hullámhosszra vonatkozóan. A lézersugárzás hullámhosszán erősen reflektáló anyagoknál az anyag felületére érkező lézerpulzus energiájának nagy része visszaverődik, és csak a maradék hasznosul (ld. 2. táblázat).

A korábbi kísérletünkben [4] 1.4304 minőségű rozsdamentes acélt használunk. A 2. táblázat alapján megjósolható, hogy az ehhez képest sokkal erősebben reflektáló ezüstöt és rézet nehezebb megmunkálni. Most derül majd ki, hogy a

2. táblázat. A megmunkált anyagok abszorpció (a), és reflexiós (r) adatai 1064 nanométer hullámhosszon

Anyag	a	r
Rozsdamentes acél [9]	0,31	0,69
Ezüst [10]	0,03	0,97
Vörösréz [10]	0,04	0,96

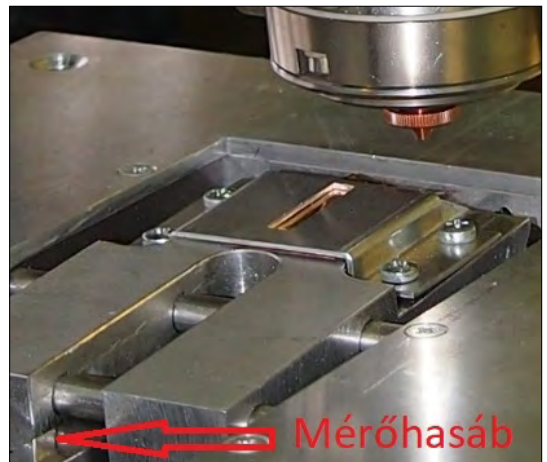
rendkívül kicsire fókuszált lézerfolt okozta nagy teljesítménysűrűség előnyt jelent-e. Problémát okozhat az is, hogy a visszavert lézersugárzás visszajut a lézerbe, ott károsodást okozva [11]. A kísérletek során a lézerfej függőleges volt, alatta a próbadarabokat a vízszintessel bezárt 8°-os szögben feszítettük ki, így a beesési és visszavert sugárzás 16 fokot zárt be, tehát közvetlenül nem jutott vissza sugárzás a lézerbe.

4.1. A kísérleti munka

A kísérletnél használt réz- és ezüsthóliáknak a lézerfej alatti vízszinteshez mért, adott szögű kifeszítéséhez készüléket terveztünk, mely a szinusz-emelő elvén működik. A készülékben a fólia szöge mérőhasábbal állítható. A 17,5 mm-es mérőhasáb-beállításához a vízszintessel bezárt 8,11°-os szög tartozik. A lézerre szerelt készülék



1. ábra. A mérőhasábbal állítható fóliafeszítő a lézerfej alatt



2. ábra. A fóliafeszítő közelebről

az **1. ábrán** látható.

- A közös kísérleti beállítások a következők voltak:
- fókuszállás a lézerfejben: $-2,6$ mm;
- munkagáz: nitrogén 5 bar nyomáson.

5. A rézfólián végzett fúrási kísérletek

50 mikrométer vastag rézfólia fúrását végeztük különböző energiájú lézerimpulzusokkal. Beállítottuk az impulzusidőt állandó értékre, 0,2 ms-ra. Változtattuk a teljesítményszintet 60-80% között; ez meghatározta a kijelzett impulzusteljesítményt. Számítottuk az impulzusenergiát, mely az impulzusteljesítmény és az impulzusidő szorzata. Tehát az összetartozó kísérleti változók, melyekkel egy furatsor készült, a **3. táblázatban** láthatók.

A **3. ábrán** a rézfólia furatai láthatók mikroszkóp alatt, hátsó megvilágításban a kép alja a lézerfejhez közelebbi régiót ábrázolja. A jobbról balra növekvő impulzusteljesítmény a fúvókához egyre közelebb lyukaszt. A furatok a kép tetején a kis sebesség és az állandó impulzusfrekvencia miatt egymásba érnek. A rögzített lézerfejhez képest 10 mm/s^2 mozgató rendszer gyorsulást és 20 mm/s mozgatási sebességet állítottuk be. A mikroszkópos mérésnél a furatok változó távolságát is mérni kellett a lézersugár terjedési irányába eső, függőleges Z koordináta számításához.

A **4. ábra** az olvasztási határenergia, és a fókuszált nyaláb kölcsönhatását ábrázolja. A fókuszolttól távol nagyon szétterül a nyaláb, itt már nem elég a felületegységre jutó energia az anyag átolvasztásához. Ilyen furatkezdeményt mutat az **5. ábra**.

A **4. ábra** és a **8. ábra** furataira a Z koordináta függvényének régiói összepárosíthatók:

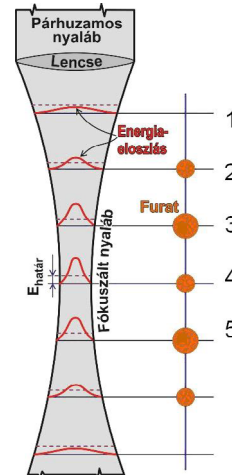
- 2. régió: A maximálisnál kisebb furatok: itt a nyaláb energiaeloszlása éppen metszi az olvasztási határt.

3. táblázat. Rézfólia fúrási kísérleténél soronként egy furatsorozathoz tartozó impulzusadatok

Impulzusidő (ms)	Impulzusenergia (mJ)	Impulzusteljesítmény (W)
0,2	198	989
0,2	213	1067
0,2	229	1145
0,2	245	1225
0,2	259	1296



3. ábra. Rézfólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban



4. ábra. Az olvasztási határenergia és a fókuszált nyaláb kölcsönhatása [4]

- 3. régió: A maximális furatok: itt a nyaláb energiaeloszlása a legnagyobb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt.
- 4. régió: A minimális furatok: itt a nyaláb energiaeloszlása a legkisebb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt, tehát itt van a nyaláb fókusza.
- 5. régió: Ismét nagyobb furatok: a nyaláb energiaeloszlása a nagyobb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt.

A **6. ábrán** látható egy, a fúvókához közel eső furat képe, ahol a nitrogéngáz szétfröcskölte az olvadt anyagot: itt nehéz átmérőt meghatározni, mert a furatok kráter alakúak és lefelé szűkülően kúposak. Ez esetben négy zóna különböztethető meg:

1. A legnagyobb kör a hőhatásövezet.
2. Utána következik a megolvadt anyag átmérője.
3. Ezután a furat átmérője a lézerforrás felőli fólia oldalon: ezeket mértük.
4. A legkisebb kör a lemez alján mérhető átmérő: sajnos ebbe a tapadásalak is beárnyékol (ld. **7. ábra**).

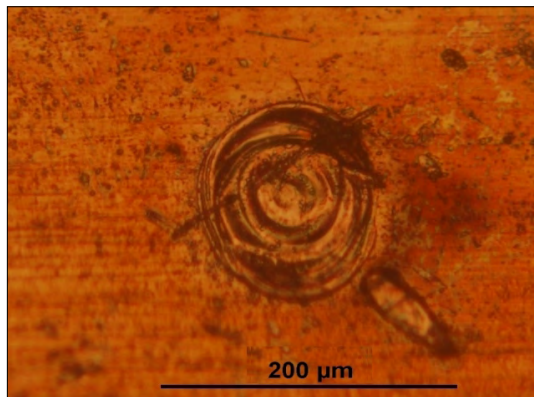
A fúvókától távolabbi furatoknak (**9. ábra**) jobbak a kontúrjai és könnyebben mérhetők – bár szabálytalanok, mivel inkább ellipszisre emlékeztetnek. A furatok körül található nagy átmérőjű hőhatásövezet az erősen reflektáló anyag miatt alakult ki: itt nem elég az impulzusenergia az anyag átolvasztásához.

A különböző fókuszhelyezettel létrejövő furatok átmérőjének Z koordinátafüggvénye közel állandó volt, az impulzusadatoktól függetlenül. Ennek oka, hogy az impulzusenergia csak kb. 25%-kal változott, és a furatok átmérőinek szórása nagy volt (ld. **6. ábra** magyarázatát).

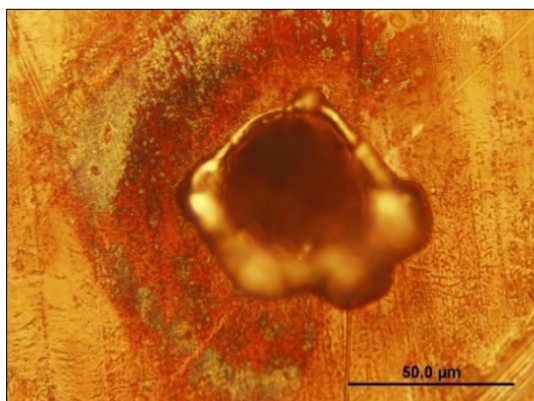
6. Az ezüsthólián végzett kísérletek

150 mikrométer vastag ezüsthólia fúrását végeztük különböző idejű lézerimpulzusokkal. Beállítottuk az impulzusidőt 0,1 és 0,5 ms között. Beállítottuk a teljesítményszintet 100%-ra; ez meghatározta a kijelzett impulzusteljesítményt, mely az első adatsor kivételével 1580 watt körül volt. Az ezüsthólia háromszor olyan vastag volt, mint a réz, ezért kellett nagyobb teljesítmény. Számítottuk az impulzusenergiát, mely az impulzusteljesítmény és az impulzus idő szorzata. Tehát az összetartozó kísérleti adatok, melyekkel egy furatsor készült, a **4. táblázat**ban láthatók.

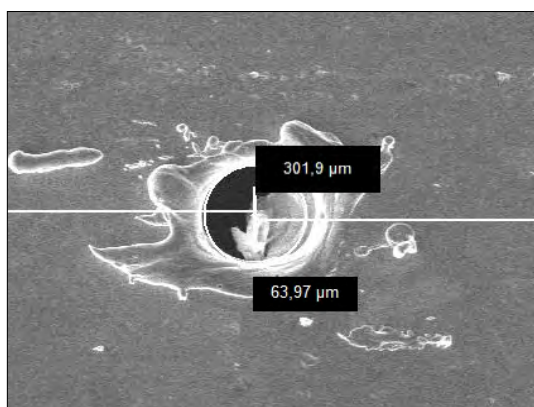
A **10. ábrán** az ezüsthólia furatai láthatók hátsó megvilágításban, a kép alja a lézerfejhez közelebbi régiót ábrázolja. Jobbra az első furatsor alja



5. ábra. A szétterülő nyaláb miatt itt nem jött létre furat



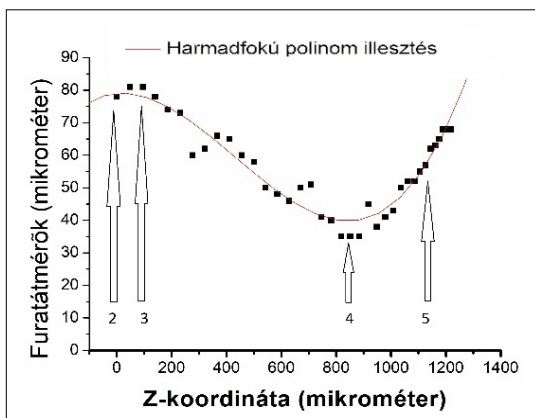
6. ábra. Egy, a fúvókához közeli furat képe



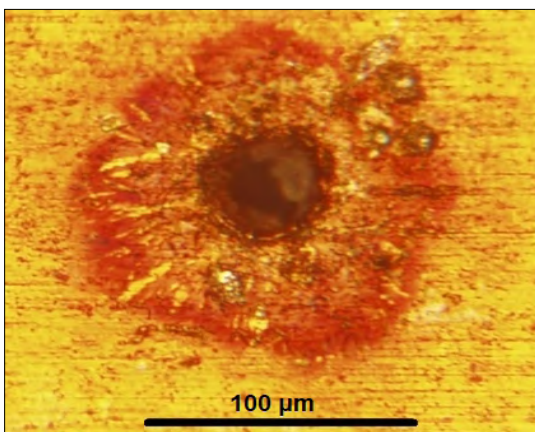
7. ábra. Egy, a fúvókához közeli furat képe, itt látszik a tapadásalak. 301,9 mikrométer a távolság a szomszéd furattól, 63,97 mikrométer a háromponos furatátmérő-mérés eredménye

hiányzik: itt nincs lyukasztás, mert 7%-kal kisebb az impulzusteljesítmény. A többi furat képe azonos lefutást mutat, mert állandó az impulzusteljesítmény.

A furatok a kép tetején és az alján a kis sebesség és az állandó impulzusfrekvencia miatt egymásba érnek. A munkadarab lézerfejhez képesti gyorsulása és sebessége és a Z koordináta korrekciója azonos a rézmintánál ismertettnél.



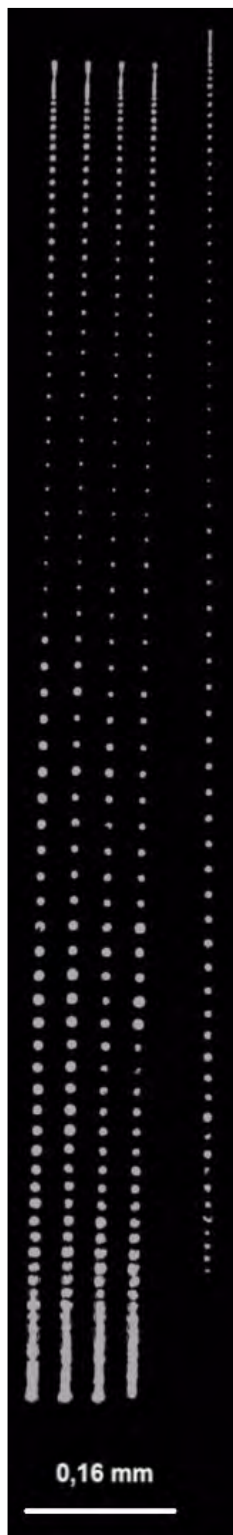
8. ábra. Rézminta 213 mJ impulzusenergiával létrehozott furatainak Z koordinátáfüggvénye és annak régiói; Z=0 a lézerfejhez közelebbi koordináta



9. ábra. Egy, a fűvókától távolabbi furat

4. táblázat. Az ezüsthólián végzett fúrási kísérletekben választott értékek a lézerimpulzus technológiai változóira nézve

Impulzusidő (ms)	Impulzusenergia (mJ)	Impulzusteljesítmény (W)
0,1	148	1481
0,2	317	1583
0,3	475	1584
0,4	636	1589
0,5	792	1583



10. ábra. Ezüsthólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban

A 4. ábra és a 11. ábra furatainak Z koordinátafüggvényének régiói összepárosíthatók: de itt csak a 3., 4. és az 5. régió figyelhető meg a nagyobb impulzusteljesítmény miatt.

A 12. ábrán egy, a fúvókához közeli furat képen olvadt anyag fröcskölési nyoma látszik, mely nehezzé teszi a furatátmérő-mérést, de nem annyira, mint a 6. ábrán a réznél látszott.

A 13. ábrán két, a fúvókától távoli kontrasztos furat képe látható, itt a hőhatásövezet kevésbé látszik, mint a réznél.

A 11. ábra tartalmazza a létrejött furatok átmérőit a lézersugár függőleges terjedési irányába eső Z koordináta szerint. Ezek erős ingadozást mutatnak, mert az összes szilárdtestlézer hátránya, hogy nem adnak egyenletes impulzusokat. Ennek az az oka, hogy nem stacionárius üzemben működnek [12].

Mivel a fókuszált lézernyaláb foltmérete rendkívül kicsi, így a plazmajelenség is könnyebben létrejön, ez is okozhat szóródást a furatátmérőkben.

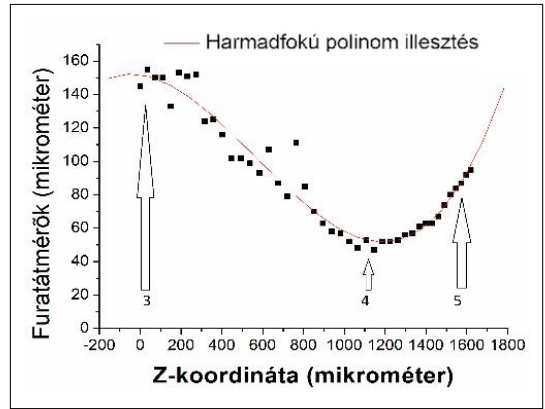
Azonban a 11. ábrához hasonlóan a furatátmérők Z koordinátafüggvénye közel állandó volt, ez azt mutatja, hogy a megmunkálás szempontjából nemcsak pusztán az impulzusenergia számít, hanem az is, hogy azt mennyi idő alatt vittük be, tehát az impulzusteljesítmény. Ez pedig $P_p = E_p / t_p$, ami a kísérlet során állandó volt. A lézersugaras megmunkálás szakirodalma is W/cm^2 felületi teljesítménysűrűség szerint osztályozza a megmunkálásokat.

Ennek ellenére levonható az a következtetés, hogy a furatátmérőkre legerősebben a Z koordináta hat. A lézerrel történő mikromegmunkáláskor ez nem zavaró, mivel ott nagyobb frekvenciával kisebb energiájú impulzusokat adnak le, így az impulzusenergia-eltérések átlagolódnak.

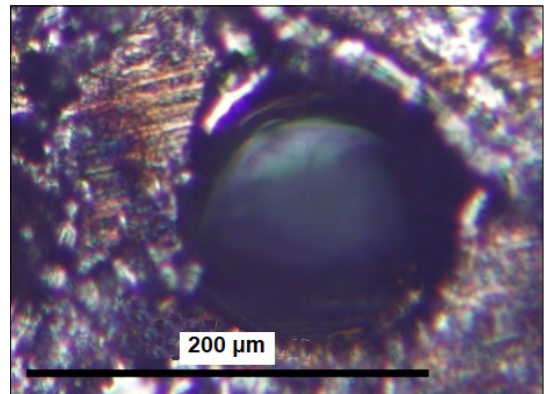
7. Következtetések:

A megmunkálólézer hullámhosszán erősen reflektáló anyagok megmunkálásakor tekintetbe kell venni, hogy az energia csak kis része hasznosul, a többi visszaverődik. A 14 mikrométeres fókuszált lézernyaláb fókuszátmérője rendkívül kis érték, ami azt jelenti, hogy a lézer energiája egy nagyon kis területre fókuszálható, tehát nagy energiasűrűség érhető el, ez kompenzálja a veszteségeket.

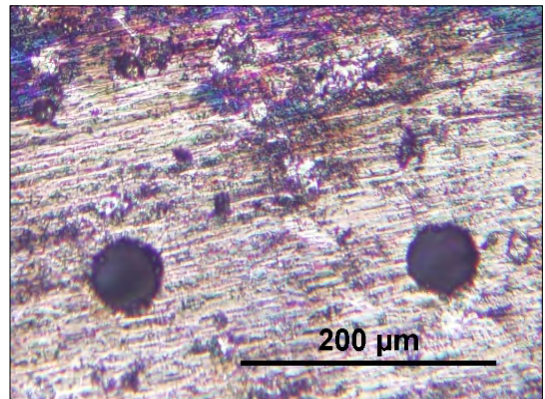
A kísérletekből kiderült, hogy a fókuszpozíciónak a legerősebb hatása a furatátmérőre, és a furatátmérők Z koordinátafüggvényei erős ingadozást mutatnak, ennek lehetséges okai:



11. ábra. Részminta 636 mJ impulzusenergiával létrehozott furatainak Z koordinátafüggvénye, és annak régiói; Z=0 a lézerfejhez közelebbi koordináta



12. ábra. Egy, a fúvókához közeli furat képe, olvadt anyag fröcskölési nyoma látszik



13. ábra. Két, a fúvókától távoli furat képe, itt a hőhatásövezet kevésbé látszik, mint a réznél

– a lézeres fúrásnál olyan nemlineáris hatások lépnek fel, mint a plazmaképződési jelenség és az elpárolgott fém párányomása;

- az összes szilárdtest-lézer hátránya, hogy nem adnak egyetlen impulzusokat. Ennek az az oka, hogy nem stacionárius üzemben működnek.
- kis egyenetlenségek a munkadarabon (50 mikrométer) a furatátmérők 10%-os változását okozhatják [13]

A jelen kísérletekhez felhasznált szállézer jó nyalábminősége és nagy impulzusteljesítménye miatt még az ilyen nehéz feladatokat is lehetővé teszi, mint az erősen reflektáló anyagok lézersugaras fűrése.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői megköszönik a Pulzor Művek ügyvezetőjének, Puskás Zsoltnak és termelésvezetőjének, Vincze Dávidnak, hogy a megtervezett kísérleteket lehetővé tették és a végrehajtásában segítettek.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras technológiák II.* Edutus Főiskola, Budapest, 2012. 79.
- [2] Kurosawa M.: *Laser drilling high-density printed circuit boards.* (letöltve: 2019. május 28.) <https://www.industrial-lasers.com/drilling/article/16485325/laser-drilling-highdensity-printed-circuit-boards>
- [3] Xiaodong N.: *Laser Welding.* Published by Sciyo Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2010. 54.
- [4] Meszlényi Gy., Bitay E.: *Az egyimpulzusos lézersugaras fűrés folyamatának elemzése.* Bányászati és kohászati lapok, Kohászat, 151/5–6. (2018) 40–44.
- [5] Paripás B., Szabó Sz., Kocsisné Baán M., Tolvaj Béláné, Bencs P.: *Lézeres mérési- és megmunkálási eljárások a gépészetben.* Miskolci Egyetem, Miskolc, 2009. 66.
- [6] Alexander F. H. K.: *Theoretical analysis of laser beam cutting.* Shaker Verlag, Aachen, 2002. 14.
- [7] Puskás Zs.: Lézeres mikromegmunkálás szállézerrel. (letöltve: 2019. április 17.) <http://docplayer.hu/720391-Lezeres-mikromegmunkalas-szallezerrel.html>
- [8] Kreisz I.: *Lézersugar-vezetés.* Edutus Főiskola, Budapest, 2011. 82.
- [9] Duley W.: *Laser welding,* 1. edition. Wiley-Interscience, 1998. 69.
- [10] Ready J. F., Farson D.: *LIA Handbook of Laser Materials Processing.* Laser Institute of America Magnolia Publishing Inc., 2001. 182.
- [11] Naeem M.: *Laser processing of reflective materials.* (letöltve: 2019. május 28.) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/latj.201390001>
- [12] Tradowsky K.: *A LASER ABC-je.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971. 99–100.
- [13] Stephen A.: *Laser micro drilling methods for perforation of aircraft suction surfaces.* Elsevier Science Direct Procedia CIRP 74, 2018. 404. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.157>