

A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál

Role of the Features of Focused Laser Beam in Pulsed Laser Cutting

Meszlényi György,¹ Bitay Enikő^{2, 3}

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

² Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia

³ Erdélyi Múzeum-Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, bitay@eme.ro

Abstract

In this article investigation of the roles of two important factors of focused laser beam, the focal spot diameter and the Rayleigh length as determining variables of the beam quality were analysed. The equations of these two factors are based on those most commonly used in the literature. The exchange between three different beam quality numbers were shown. It is proven on the basis of the scientific literature, that the beam quality degrades compared to the original data given by the factory of laser. The causes of the beam quality degradation are lens aberrations in the optical path of the given laser, and the shifting of the beam propagation ratio (M^2) to higher values. A new equation for estimation of the new, lowest value for M^2 factor is presented, based on the comparison of the laser cut material thickness to the depth of focus, which is two times the Rayleigh length.

Keywords: laser cutting, laser beam, beam diameter, beam quality, beam propagation ratio (M^2), Rayleigh length.

Összefoglalás

Jelen cikkben a fókuszált lézernyaláb keresztmetszete két fontos jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak mint a szakirodalomban legelterjedtebb képleteiben szereplő változóknak a hatását elemeztük. A mindkét képletben szereplő, a nyalábminőséget kifejező változók egymásba való átváltását ismertetjük, és a szakirodalom alapján bebizonyítjuk, hogy a lézereknél a gyárilag megadott értékekhez képest a lézernyaláb optikai sugármenetében lévő lencsék hibái miatt a nyalábminőség romlani fog, tehát az M^2 tényező értéke nő. A megnövekedett M^2 változó alsó határának becslésére bemutatunk egy új összefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul.

Kulcsszavak: lézersugaras vágás, nyalábkeresztmetszet, nyalábtátmérő, nyalábminőség, Rayleigh-hossz.

1. Bevezetés

Lézersugaras megmunkálásnál fontos szerep jut a megmunkáló lézernak, ezen belül a fókuszált nyaláb keresztmetszeti jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek, mert a fókuszált nyaláb az az érintésmentesen dolgozó szerszám, mely energiaátadás útján a megmunkálást végzi. Miért fontos tudni, hogy mekkora a fókuszfoltátmérő? Mert ki-

sebb fókuszfoltátmérővel lézersugaras vágásnál kisebb vágási rés, emiatt kisebb salakmennyiség érhető el, tehát jobb vágási minőséget kapunk, kevesebb utómegmunkálásra van szükség. A kevésbé szétterülő nyaláb miatt a hőhatásövezet is kisebb. A fókuszfolt átmérőjének képletei több szakirodalomban megegyeznek, csak a közös formátum eléréséhez néhol meg kell duplázni a

sugarat, hogy az átmérőt megkapjuk, és a nyalábminőség-adatokat át kell számítani: a K nyalábterjedési tényező reciprokját, az M^2 nyalábminőség tényezőt beírva a képletbe (ld. 2. pont) [1], [2], [3], [4]:

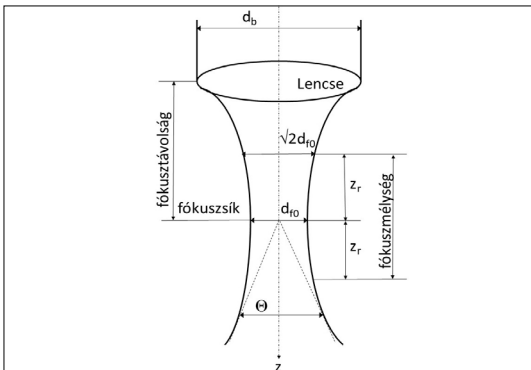
$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_b} \tag{1}$$

Itt λ a lézer hullámhossza, f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz-távolsága, M^2 a nyalábminőség tényező, mely megmondja, hogy az ideális Gauss-nyalábhoz képest hány-szoros a vizsgált nyalábnak a fókuszfoltátmérője, d_b a fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője. Ha a fókuszáló lencsére eső közel kollimált lézernyalábot tágítjuk, akkor az alul szereplő d_b nyalábátmérő szorozódik a nyalábtágító faktorával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e), ami megmondja, hogy hány-szoros lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest [1]:

$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_b B_e} \tag{2}$$

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszstíktól mért azon hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádiusza gyök kettőszeresére 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, ezt nevezzük fókuszmélységnek, tehát ha lézeres vágásról van szó, körülbelül ilyen vastag anyagot tud átvágni a lézer. Képlete nagyon hasonló a lézerfoltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz-távolsága és a lencse előtti nyalábátmérő a négyzeten szerepel [1], [4]:

$$z_r = \pm \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_b^2 B_e^2} \tag{3}$$



1. ábra. A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése

A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőit az 1. ábra szemlélteti, ahol a z-koordináta a lézernyaláb terjedési irányába mutat, Θ a fókuszált nyaláb széttartási szöge. Az 1. ábra az [1] és az [5] szakirodalom ábráinak egyesített jellemzői alapján készült. A nyalábminőséget tárgyalják a következő cikkek: [6], [7], [8], [9].

2. A nyalábminőség mérőszámai

A fókuszált nyalábkeresztmetszet két legfontosabb jellemzője a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz definíciójában szereplő nyalábminőség tényező. Jó, ha tudjuk, milyen megadási módjai vannak a nyalábminőségnek, és azt is, hogyan lehet ezeket egymásba átváltani.

A nyalábparaméter szorzat (BPP) a lézernyaláb fókuszálhatóságát fejezi ki, melyet leggyakrabban a rezonátorbeli nyalábderéksugár és a távoli mező divergenciaszöge, Θ_σ szorzataként adnak meg, amit 4-gyel elosztanak. Itt Θ_σ : a táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge [10]:

$$BPP = \frac{d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{4} \tag{4}$$

A harmadik megadási mód a nyalábminőség tényező, annak a mértéke, hogy mennyire közelíti meg a nyalábparaméter szorzat az ideális Gauss-nyaláb diffrakciós határát [10]:

$$M^2 = \frac{\pi d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{\lambda} \tag{5}$$

A másik megadási mód a K nyalábterjedési tényező, mely M^2 reciproka: [10].

$$K = \frac{1}{M^2} \tag{6}$$

M^2 nem ideális nyalábra > 1 , és $K < 1$. A fenti képletekből következik, hogy ha a három, a nyalábminőséget jellemző változóból egy adva van, akkor a többi ebből számolható, de ehhez a lézer hullámhosszát is kell tudni, és a mértékegységek átváltására oda kell figyelni.

3. A nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása fókusz-foltátmérőre és a Rayleigh-hosszra.

Előrebocsátom, hogy a nyalábminőség tényező méréséről az ISO11146 szabvány rendelkezik. A korrekt méréshez „a fókusz környezetében, a sugártengely mentén legalább tíz helyen meg kell mérni a lézernyaláb $d(z)$ átmérőjét. A mérési helyek felének a Rayleigh-hosszon (z_R) belülre kell esnie, a másik felének a Rayleigh-hossz két-

szeresén kívül” [11]. A nyalábminőség tényező és a fókuszált nyalábkeresztmetszet méréséhez e dolgozatban vizsgált impulzusüzemű lézereknél a nem folyamatos lézerműködés miatt nem használhatóak az egyszerűbb késélszkennelő vagy részszenkelő módszerek, hanem mátrixérzékelős detektorra, illetve a detektor nagy érzékenysége miatt többfokozatú nyalábgyengítésre van szükség, olyan módon, ami nem befolyásolja a mérés eredményét: nem torzíttja az eredetileg mérendő nyaláb jellemzőit [11]. Ezek nagyon drága eszközök, egy ilyen eszköz ingyenes használatáról tárgyaltunk a tulajdonos céggel. Sajnos ilyen feltételek mellett ingyenes kiszállás, eladás lehetősége nem áll fenn, nem álltak szóba velünk.

Amit az alábbiakban be szeretnénk mutatni: milyen a nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása a fókuszfoltátmérőre és a Rayleigh-hosszra. Ez a fent röviden idézett valóság egy leegyszerűsített modellje, mely mégis hasznos eredményekhez vezet. Azért is lehet megvizsgálni ezt a közelítést, mert a vizsgált lézerek móduszerkezete az ideális Gauss-nyalábot megközelítő TEM₀₀ közeli a szerviz közlése alapján. Egyszerűbben kezelhető és vizsgálható így a fókuszált nyalábkeresztmetszet lehetséges változása, annak becslése e két mennyiség vizsgálatán keresztül. Ami még indokolja ezt az elemzést, az, hogy a lézersugaras megmunkáláskor a nyaláb fókuszfolt közeli részét használjuk, érdekes, hogy hol van a fókusz, mekkora a fókuszfoltátmérője és a kétszeres Rayleigh-hossz, amin belül dolgozni lehet a lézerral. Milyen további előnyökkel jár a két fenti mennyiség vizsgálata? E két változó alapján függvényekkel leírható a fókuszált nyaláb geometriája: a nyalábátmérő a nyalábterjedés irányába mutató z-koordináta függvényében, ahol z_0 a fókuszszík z-koordinátája [1]:

$$d_f(z) = d_{f0} \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_r}\right)^2} \quad (7)$$

Felidézve a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletét, analizáljuk, hogy mitől függ a képletek eredménye, mindkét képletben (2 és 3) ugyanazok a mennyiségek szerepelnek, ezt az analízist a korábbi cikkeinkben [12], [13], [14], [15], [16] elvégzett vágási kísérletekhez kötjük.

- A hullámhossz: a kísérletekben használt Nd:YAG lézer hullámhossza, elhanyagolható módon változik.
- A fókuszálólencse fókusz távolsága állandó: 50 mm volt.

- A fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb-átmérő egyenlő a tágitatlan nyalábátmérő db szorozva a nyalábtagító szorzószámmal. Be: adott nyalábtagító állásnál mindkettő konstans, a nyalábtagító hatását később vizsgálom.
- A képletekben szereplő többi tényező konstans.

Most vizsgáljuk meg a nyalábminőség tényező változásának általam megtalált eseteit, melyek általában a gyárilag megadott nyalábminőség romlását, ezzel a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz növekedését jelzik.

Ötféle információ, amelyből arra következtünk, hogy változik a nyalábminőség tényező:

1. A LASAG KLS 246 FC mikro megmunkálásra kifejlesztett Nd:YAG lézer hajlamos a termikus lencsézésre: nagyobb átlagteljesítménynél a kristályrúd közepe melegebb, jobban kitágul, mint a külső felülete: tehát a két vége átlagteljesítménytől függően változó görbületű lencseként működik. Hasonló effektus került leírásra az egyik szakirodalomban: [5]. A szerviz közlése szerint 5 W átlagteljesítményig $M^2 = 3$, a maximális 15 W átlagteljesítménynél $M^2 = 5$, a kettő között lineárisan változik.
2. A zoomos 8-fokozatú nyalábtagító mint optikai rendszer legalább 3 lencséből áll, mert 2 lencse kellene a Galilei-távcső rendszerű, fix nyalábtagításúhoz. Ezeknek a lencséknek is van képhibájuk, nézzük most a legerősebb hatását: a szférikus aberrációt. A szférikus aberráció lényege, hogy az optikai tengelytől sugárirányban eltávolodva minél kijebb lévő gyűrűt vizsgálunk, annál közelebb lesz a fókusz a lencséhez, tehát a fókuszfoltátmérő megnő. A LASAG szerviz azt írta, hogy 1-es nyalábtagító állásnál vegyük ki a nyalábtagítót, hiszen ekkor az csak átengedi a kollimált nyalábot, ez is arra utal, hogy a nyalábtagító ront a fókuszálhatóságon.
3. Kaplan könyve szerint [1] erős fókuszálásnál, kis F -számoknál nem igazak az r_{f0} fókusz sugár és z_r képletei, hanem korrekciókat kell bevezetni (itt $F = f/d_b$):

$$r_{f0} = \frac{2\lambda F}{\pi K} + \frac{k_{sa} d_b}{2F^2} = \frac{2\lambda f}{\pi d_b K} + \frac{k_{sa} d_b^3}{2f^2} \quad (8)$$

Tipikus értékek n törésmutatójú lencsékre és a lencsék aberrációit korrigáló k_{sa} faktorokra a lencse anyagától függően a következők:

ZnSe	$n=2,40$, $k_{sa}=0,0312$
GaAs	$n=3,27$, $k_{sa}=0,0139$

Egy dolog biztosan kiderül ebből az egyenletből: r_{f0} , ezzel együtt d_{f0} és z_r értéke nagyobb

lesz, tehát a nyaláb fókuszálhatósága romlik. Itt külön szerepel K nyalábterjedési tényező és a korrekció, én ezt „belegyűrnám” M^2 tényező értékebe, mert nekem így lenne logikus, még akkor is, ha a szerző külön kezeli ezeket. A 4. pontban idézett cikkben ez a korrekció már M^2 tényezőben szerepel. Két dolog miatt azonban ezekkel a korrekciókkal nem tudok számolni: az első, hogy a szerző nem mondja meg, hol a határa az erős fókuszálásnak. Nyilván nagy lencse előtti nyalábtátmérőt és kis fókusz távolságú lencsét jelent, azt sejttem, hogy a maximális nyalábtágító állás és az 50 mm-es fókuszálólencse idetartozik. A második, hogy nem ismerve a lencse anyagát, nem tudom, melyik korrekciós faktort válasszam.

4. Harp cikke [4]: A Practical method for determining the beam profile near the focal spot, mely egy rangos Springer-folyóiratban jelent meg, a fókuszált lézernyaláb elé ferdén elhelyezett anyagon hegesztési varratokat készítve elemezte az IPG Photonics gyártmányú 300 W, CW, Ytterbium Fiber Laser nyalábminőségét. A kezdeti nyalábminőség tényező $M^2 = 1,04$ volt. A lézernyaláb 9 μm -es százból lépett ki, és párhuzamosítás után 4,5 mm volt az átmérője. Ötszörös nyalábtágítót használtak a kisebb fókuszolt elérésére, mely után három különböző fókuszálólencsét próbáltak ki, sorra: 150 mm, 100 mm és 60 mm fókusz távolságúakat. A gyárilag megadott M^2 értéket a cikkben először a lencsék meg nem nevezett optikai hibái miatt korrigálja: itt is a lencse fókusz távolságának négyzetével oszt a korrekcióban, az „a” tényezőt a hegesztési kísérletből veszi:

$$M^2 = M_0^2 + \frac{a}{f^2} \quad (9)$$

A cikkben az eredményeket összesítő diagram a 60 mm fókuszú lencsére vonatkozóan a fenti korrekcióval a kezdeti 1,05-ös M^2 érték felmegy 2,5-re, a szférikus aberrációt is beleszámítva 6 körüli érték lesz.

5. Zimmermann cikkében [3] IPG gym. YLR-200-SM egymódusú szállézer vizsgál, a kollimált nyalábra megadja a fókuszálatlan nyalábtátmérőt, az ebből kiszámolt elvi fókuszoltátmérőt, a Rayleigh-hosszat és a teljesítménysűrűséget. De a valóságban a fókuszálólencse optikai hibái, elsősorban a szférikus aberráció megnöveli az elvileg elérhető fókuszolt méretet. A fókuszolt átmérő a fókuszálólencse előtti nyalábtátmérő köbével arányosan nő. ISO 11145 és 11146 szabvány szerinti késélszkennelő módszerrel

mérték a fókuszált nyaláb változóinak értékeit. A kísérleteknél vizsgálták a lézersugár terjedési irányába eső, a lézer teljesítményétől függő fókuszeltolódást, ami 89 mikrométeres Rayleigh-hosszat meghaladó 110 mikrométer körüli érték volt. Ezt a fókuszeltolódást a lézert vezető optikai elemek és foglataik felmelegedése okozza. Adatok a számoláshoz: hullámhossz: 1070 nm, $M^2 < 1,1$; fókuszálólencse fókusz távolsága: 50 mm, eredeti nyalábtátmérő: 6,5 mm [4]. A kísérlet érdekessége, hogy a kétszeres nyalábtágítót egyszer tágítóként alkalmazták, így nagyobb lett a mért fókuszoltátmérő, mint az elvi érték (1. táblázat 3. sor), aztán kétszeresére szűkítették a nyalábot, így az elvi értékhez képest kisebb fókuszoltátmérőt kaptak (1. táblázat 1. sor). A szűkítés haszna, hogy nőtt a Rayleigh-hossz: vastagabb anyagot lehet megmunkálni.

A nyalábminőség romlását okozhatja a fókuszálólencse előtti védőüveg szennyeződése, melyet a munkadarabról visszafrocskölődő kicsi anyagcseppek is okozhatnak, ha ezt észleljük, ki kell cserélni a védőüveget.

1. táblázat. A [3] cikkbeli elvi kiszámolt értékek és a mérési eredmények összevetése

Nyalábtátmérő (mm)	3,25	6,5	13
Elvi fókuszolt átmérő (μm)	23	12	6
Elvi Rayleigh-hossz (μm)	355	89	22
Mért fókuszolt átmérő (μm)	20	14	9,4

4. Az M^2 tényező romlásának becslése öt korábbi kísérletnél

Most egy új módszert mutatunk be, mellyel M^2 tényező romlására egy alsó közelítést lehet adni a megmunkált anyagvastagság és a Rayleigh-hossz összehasonlításával. A korábban elvégzett öt kísérletnél LASAG KLS 246 FC lézert használtunk. A szerviz közlése alapján a lézerre $M^2 (P_{\text{átlag}} = < 5\text{W}) = 3$ és $M^2 (P_{\text{átlag}} = 15\text{W}) = 5$ és e két érték között lineáris. Ebből felírható az egyenes egyenlete $y = 0,2x + 2$ ha $5 < x < 15$, ahol y az M^2 tényező és x a $P_{\text{átlag}}$. Az első három kísérleti megmunkálás jellemzőit bemutató táblázatban (2. táblázat) így kiszámolható az M^2 tényező, amely 3,7 és 4,2 közötti értékekre jön ki. Így a fókuszolt mérete és a Rayleigh-hossz első közelítése kiszámolható. A Rayleigh-hossz kétszerese sokkal kisebb volt, mint az átvágott anyag vastagsága, ezért újra korrigálnom kellett az M^2 tényezőt.

A Rayleigh-hossz = az anyagvastagság (v_n) fele

egyenletből (3) képletet átrendezve egy új egyenlet felállítva (10) kiszámoltam az új M^2 tényező becsült értékét, ami 7 körüli értéket adott.

$$\frac{v_a}{2} \pi d_b^2 B_c^2 = M_{új}^2 \quad (10)$$

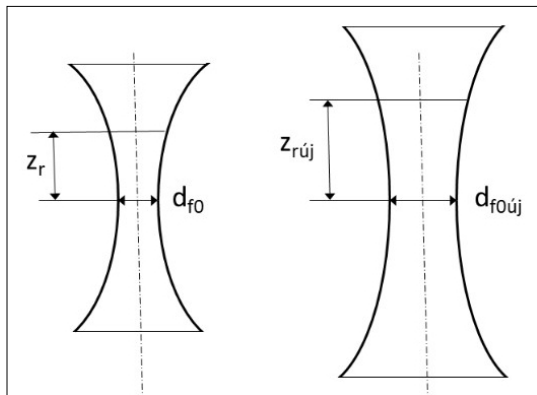
$$\frac{v_a}{4\lambda f^2} = M_{új}^2$$

A kiszámolt új M^2 tényezővel újra kiszámoltam a fókuszfolt átmérőjét, ami 20 mikrométer körüli volt, amiben az az érdekes, hogy 8-as nyalábtágítónál kb. ekkora volt a vágási rés (2. táblázat). A kapott eredményeket szemlélteti a 2. ábra: sikerült a kísérleti eredményekhez illeszteni a modell paramétereit.

A 0,4 mm-es 4-es nyalábtágítóval végzett lemezvágási kísérletre alkalmazva a fenti gondolatmenetet az M^2 tényező a szerviz közlése alapján felállított egyenletből 3,8–4,8 közötti értékre jött ki. Az ennek alapján kiszámolt Rayleigh-hossz kétszerese most sem érte el az anyagvastagságot. A Rayleigh-hosszat egyenlővé téve az anyagvastagság felével M^2 -re 5,9 jött ki, ami 1-gyel kisebb, mint a 8-as nyalábtágítónál (3. táblázat). Az eredmény megegyezik az eddig ismertett elemzésekével, nyilván ha csökken a lencserendszereken átvezetett nyaláb átmérője, ha 8-as helyett 4-es nyalábtágító szorzót alkalmazunk, akkor csökken a szférikus hiba, tehát javul a nyalábminőség.

2. táblázat. M^2 tényező és d_{f0} és z_r elméleti és az átvágott cső anyagvastagság alapján korrigált új értékei

	1. kísérlet [8]	2. kísérlet [9]	3. kísérlet [10]
Anyagvastagság (mm)	0,117	0,12	0,12
Művelet	vágás	vágás	vágás
Átlagteljesítmény	8–11,2 W	10–12 W	8,7 W
Közepes átlagteljesítmény	9,6 W	11 W	8,7 W
M^2 közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján	3,9	4,2	3,7
d_{f0} (μm)	13,3	14,2	12,7
$\pm z_r$ (μm)	$\pm 33,2$	$\pm 35,6$	$\pm 31,7$
Az átvágott falvastagság miatt szükséges $z_{rúj}$ (μm)	$\pm 58,5$	± 60	± 60
Ebből kiszámolt új M^2 tényező	6,9	7,1	7,1
Ebből kiszámolt új fókuszfoltátmérő (μm)	23,4	24	24



2. ábra. A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz elméleti és becsült M^2 tényező alapján kiszámolt értékeinek szemléltetése

3. táblázat. M^2 tényező és d_{f0} és z_r elméleti és az átvágott lemez anyagvastagság alapján korrigált új értékei

	4. kísérlet [11]	5. kísérlet [12]
Anyagvastagság (mm)	0,4	0,4
Anyageometria	lemez	lemez
Anyagminőség	AISI 304L	AISI 304L
Művelet	vágás	vágás
$P_{\text{átlag}}$	12,5–16	9,2
Nyalábtágító szorzó	4	4
Közepes átlagteljesítmény	14,25 W	9,2 W
M^2 közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján	4,85	3,84
d_{f0} mikrométer	32,87	26,02
$\pm z_r$ mikrométer	$\pm 164,3$	$\pm 130,12$
Az átvágott falvastagság miatt szükséges $z_{rúj}$ (μm)	± 200	± 200
Ebből kiszámolt új M^2 tényező	5,9	5,9
Ebből kiszámolt új fókuszfoltátmérő (μm)	40	40

5. Összefoglalás

A cikkben a fókuszált lézernyaláb keresztmetszete két fontos jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak mint a szakirodalomban legerjedtebb képleteiben szereplő változóknak a hatását elemeztük. A mindkét képletben szereplő, a nyalábminőséget kifejező változók egymásba való átváltását ismertetjük,

és a szakirodalom alapján bebizonyítjuk, hogy a lézereknél a gyárilag megadott értékekhez képest a lézernyaláb optikai sugármenetében lévő lencsék hibái miatt a nyalábminőség romlani fog, tehát M^2 tényező értéke nő. A megnövekedett M^2 változó alsó határának becslésére bemutatunk egy új összefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kaplan A. F. H.: *Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting*. Shaker Verlag, Aachen, 2002. 12–14. ISBN 3-8322-0803-8
- [2] Paripás B., Szabó Sz., Kocsisné Baán M., Tolvaj B., Bencs P.: *Lézeresmérési és megmunkálási eljárások a gépészetben*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009. 66–67.
- [3] Zimmermann M., Mys I., Schmidt M.: *Micro cutting of thin sheets with single mode fiber lasers*. Laser assisted net shape engineering 5. Proceedings of the LANE, 2007. 220–224.
- [4] Harp W. R., Paleocrassas A. G., Tu J. F.: *A Practical method for determining the beam profile near the focal spot*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 37. (2008) 1113–1119. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>
- [5] Wirth P.: *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*. Hamburg, Germany, Rofin-Sinar Laser, 2000. 14–59.
- [6] Hemmerich M., Thiel C., Lupp F., Hanebuth H., Weber R., Graf T.: *Reduction of Focal Shift Effects in Industrial Laser Beam Welding by Means of Innovative Protection Glass Concept*. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. Physics Procedia, 56. (2014) 681–688. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.161>
- [7] Rodrigues C., Vanhove H., Duflou J. R.: *Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional fiber and CO₂ technologies*. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. Physics Procedia, 56. (2014) 901–908. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>
- [8] Thombansen U., Hermanns T., Stoyanov S.: *Setup and Maintenance of Manufacturing Quality in CO₂ Laser Cutting*. 2nd International Conference on Ramp-Up Management 2014 (ICRM). Procedia CIRP, 20. (2014) 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.037>
- [9] Hashemi S. S., Sabouri S. G., Khorsandi A.: *In situ measurement of laser beam quality*. Applied. Physics B (2017) 123–233. Springer-Verlag GmbH Germany, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6811-y>
- [10] MSZ EN ISO 1145 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések. Szakszótár és jelképek (ISO 1145:2018)
- [11] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I*. Edutus Főiskola, 2012. 24–29.
- [12] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Puskás Zs.: *Laser cutting of high precision tubes*. Material Science Forum, 589. (2008) 427–431. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.589.427>
- [13] Meszlényi Gy., Bella Sz., Nagy P., Dobránszky J.: *Laser beam cutting and welding of coronary stents*. BID-ISIM Welding and material testing, (2008) 14–11.
- [14] Meszlényi Gy., Izápy V.: *Optimization method of laser cutting parameters for high precision stainless steel tubes*. In: Proceedings of the SIP 2008, 26th International Conference Science in Practice Osijek, Horvátország, 2008. 95–97.
- [15] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Dévényi L.: *Laser cutting of stainless steel thin sheets with pulsed Nd:YAG laser*. 6. In: Országos Gépészeti Konferencia, Gépészet 2008, Budapest. Magyarország, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2008. 1–5.
- [16] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Puskás Zs.: *Role of the laser focus position in the laser beam cutting of thin stainless steel sheets*. Material Science Forum, 659. (2010) 209–214.