

Szállézerek sugármenetének elemzése a nyálábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig

Analysis of Fibre Laser's Optical Construction from the End of the Beam Guiding Optical Fibre to the Focal Spot

Meszlényi György,¹ Bitay Enikő²

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

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

Abstract

In material-processing fiber lasers, the resonator in the closed box produces the laser radiation. Even with the same resonator, the diameter of the laser beam transporting fiber optics and the properties of the optical elements in the laser focusing head decide the cross-section of the focused laser beam used for machining. If we summarize the formulas in different sources in the literature, we can predict the effect of each optical element: what will happen if we choose another focusing lens, put a beam expander in the system, set on the beam expander how many times the laser beam expands. The other important point is that if we want to repeat an experiment or start a production process based on a scientific publication, then in addition to the resonator, it would be good to know the data of the optical elements in the focusing head, which is usually incomplete in the presented articles, but we can determine them approximately using the four formulas listed in the article.

Keywords: *fibre laser, laser micromachining, focusing head.*

Összefoglalás

Anyagmegmunkáló szállézeréknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást. Azonos rezonátor esetén is a nyálábtovábbító optikai szál átmérője és a fókuszálófejben lévő optikai elemek tulajdonságai döntik el, hogy milyen lesz a megmunkáláshoz felhasznált, fókuszált nyáláb keresztmetszete. Ha összegezzük a szakirodalomban, különböző forrásokban szereplő képleteket, akkor meg tudjuk jósolni az egyes optikai elemek hatását: pl. mi lesz, ha másik fókuszálólencsét választunk, beteszünk a rendszerbe egy nyálábtágítót, vagy a nyálábtágítón beállítjuk, hogy hányszorosára táguljon a lézernyaláb. A másik fontos szempont, hogy ha meg szeretnénk ismételni egy kísérletet vagy el szeretnénk indítani egy gyártási folyamatot egy tudományos publikáció alapján, akkor a rezonátoron kívül jó lenne a fókuszálófejben lévő optikai elemek adatait ismerni, ami általában hiányosan szerepel a bemutatott cikkekben, de a jelen cikkben ismertetett négy összefüggés segítségével közelítőleg meg tudjuk határozni őket.

Kulcsszavak: *szállézer, lézeres mikromegmunkálás, fókuszálófej.*

1. Bevezetés

Anyagmegmunkáló szállézeréknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást, ahol lézerdiódák adják át az energiájukat a nyitó- és zárótükör funkcióját ellátó, Bragg-rácscsal felszerelt, gerjesztett optikai szálnak. Innen a nya-

lábtoábbító optikai szállal viszik el a sugárzást a fókuszálófejhez. Jelen cikkben a mikromegmunkálás terén alkalmazott szállézeret elemezzük.

A fókuszálófejben kilép a lézersugárzás a nyálábtovábbító optikai szálból, egy adott kúpszögön belül, amit az optikai szál numerikus apertúrája

jellemez. A nyalábtovábbító optikai szálból kilépő sugárzást párhuzamosítja a kollimátor lencse, ezt követheti opcionálisan egy nyalábtágító, majd a fókuszálólencse a munkadarabra fókuszálja a nyalábot, melynek relatív mozgása a munkadarabhoz képest elvégzi a kitervelt műveletet, mely lehet fúrás, vágás, hegesztés stb. A cikkben felhasznált mennyiségeket, jelöléseket és mértékegységüket az **1. táblázat** tartalmazza a mikromegmunkálásnál használatos mértékegységeket alkalmazva, bár a hullámhosszt nanométerben szokták megadni, az (1) és (2) képletben akkor adódik ki a mikrométer mértékegység, ha a hullámhosszt is mikrométerben helyettesítjük be.

Lézeres 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. A fókuszfolt átmérőjének képletei több szakirodalomban megegyeznek, csak a közös formátum eléréséhez néhol meg kell duplázni a sugarat, hogy az átmérőt megkapjuk, és a nyalábminőségi adatokat át kell számítani: a K nyalábterjedési tényező reciprokát, az M^2 nyalábminőségi tényezőt beírva a képletbe (1) [1, 2].

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

Itt λ a lézersugárzás hullámhossza, f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, M^2 a nyalábminőség tényező, mely megmondja, hogy az ideális Gauss-nyalábhoz képest hányszorosa a vizsgált nyaláb fókuszfoltátmérője, d_b a fókuszálólencse előtti, közel kollimált lézernyaláb átmérője. Ha a fókuszálólencsére eső, közel kollimált lézernyalábot tágítjuk, akkor az

1. táblázat. A cikkben használt mennyiségek jelei, megnevezései és mértékegységei

| Jel | Megnevezés | Mértékegység |
|------------|--|---------------|
| F | a fókuszálólencse fókusz távolsága | mm |
| f_{coll} | a kollimátor fókusz távolsága | mm |
| d_{fc} | a nyalábvezető optikai szálmagátmérője | μm |
| d_b | a párhuzamosított nyaláb átmérője | mm |
| d_{f0} | fókuszfoltátmérő | μm |
| λ | hullámhossz | μm |
| M^2 | nyalábterjedési tényező | nincs |
| Z_R | Rayleigh-hossz | μm |

alul szereplő d_b nyalábátmérő szorzódik a nyalábtágító szorzószámával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e), ami megmondja, hogy hányszorosa lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest [1]. A fókuszált lézernyaláb foltátmérőjének képletéből (1) következik, hogy minél kisebb az M^2 tényező értéke, annál kisebb területre fókuszálható a lézer energiája.

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszsíktól mért azon hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádiusza gyök kettő-szeresére nő, ezért a felületegységre jutó impulzusenergia a felére esik vissza a fókuszfoltban számíthatóhoz képest. Általában a Rayleigh-hossz kétszeresén belül tekintik fókuszban levőnek a nyalábot. Képlete nagyon hasonló a lézerfoltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz távolsága és a lencse előtti nyalábátmérő a négyzetben szerepel (2) [1].

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

Ami még indokolja ezt az elemzést, az, hogy a lézeres megmunkáláskor a nyaláb fókuszfolt közeli részét használjuk, érdekes, hogy hol van a fókusz, mekkora a fókuszfoltátmérője és a kétszeres Rayleigh-hossz, amin belül lehet dolgozni 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 fókusz sík z-koordinátája: [1].

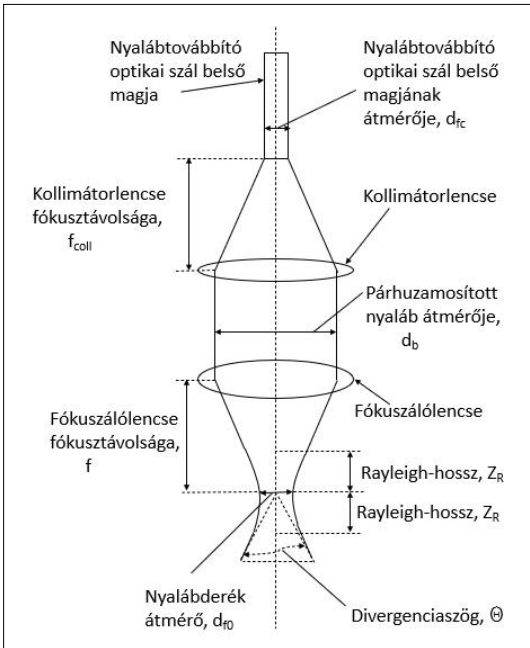
A szakirodalomban található még egy képlet szállézerek fókuszfoltátmérőjének megadására, melyben f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, d_{fc} a lézertovábbító optikai szál magátmérője, f_{coll} a lézersugarat párhuzamosító kollimátor fókusz távolsága (3) [3, 4]. Ezt a képletet mindkét hivatkozott irodalom közelítő képletnek nevezi, ezért az ennek alapján kiszámolt értékeket két értékes jegyre adjuk meg. Egy másik cikkben a képlet a nyalábtágító szorzószámával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e) bővül (4) [5].

$$d_{f0} = \frac{d_{fc} f}{f_{coll}} \tag{3}$$

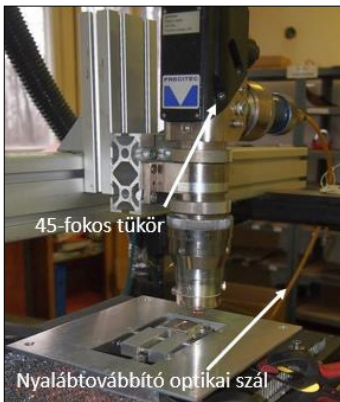
$$d_{f0} = \frac{d_{fc} f}{f_{coll} B_e} \tag{4}$$

2. Elemzés

Az eddig tárgyalt optikai elemeket és a lézerfej sugármenetét az **1. ábra** mutatja, magát a lé-



1. ábra. A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése



2. ábra. A lézerberendezéshez tartozó fókuszálófej

zerfejet a 2. ábra, melyen látható a sárga színű védőburkolattal ellátott nyalábtovábbító optikai szál és a fókuszálófej egy 45 fokos tükörrel, mely 90 fokkal eltéríti a nyalábot függőleges irányba.

Azonos rezonátor esetén is a nyalábtovábbító szaloptika átmérője és a fókuszálófejben lévő optikai elemek tulajdonságai döntik el, hogy milyen lesz a megmunkáláshoz felhasznált, fókuszált nyaláb keresztmetszete. Ha összegezzük a szakirodalomban különböző forrásokban szereplő képleteket (1), (2), (3), (4), akkor meg tudjuk határozni az egyes optikai elemek hatását: mi lesz, ha másik fókuszálólencsét választunk, beteszünk

a rendszerbe egy nyalábtágítót, a nyalábtágító beállítását módosítjuk. Ezekre a változtatásokra szükség lehet, ha jelentősen változnak a megmunkálási feladatok: a lézersugárzás változatlan hullámhosszán jelentősen eltérő elnyelési tényezőjű anyagot, más anyagvastagságot vagy más felületi kiképzésű munkadarabot kell megmunkálni. A fókuszálólencse cseréjét vagy nyalábtágító rendszer beépítését egy kísérleti lézer elrendezésben meg lehet tenni, de egy adott gyártó által szállított rendszer esetén a gyártótól kell megrendelni az átalakítást, a lézerbiztonsági szempontokat is figyelembe véve.

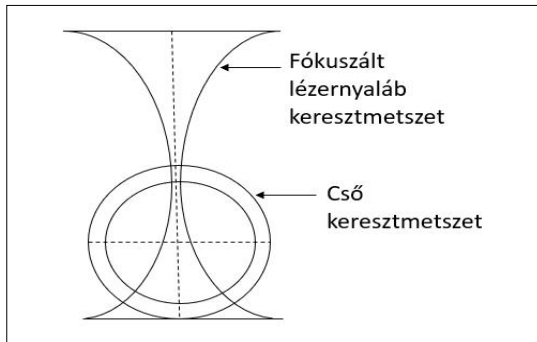
A másik fontos szempont, hogy ha meg szeretnénk ismételni egy kísérletet vagy el szeretnénk indítani egy gyártási folyamatot egy tudományos publikáció alapján, akkor a rezonátoron kívül jó lenne a fókuszálófejben lévő optikai elemek adatait ismerni, amelyek általában hiányosan szerepelnek a bemutatott cikkekben, de az előbb felsorolt négy képlet segítségével közelítőleg meg tudjuk határozni őket. A lézeres megmunkálást bemutató cikkeknel általában nem adják meg a fókuszálófejben lévő lencsék görbületeit, törésmutatóit, így az optikai tervezésben használt sugáratvezető szoftverekkel nem lehet számításokat végezni a bemenő adatok hiányában.

Az (1) képletet elemezve, ha a fókuszálólencse fókusztávolságát csökkentjük, akkor elvben a foltméret lineárisan csökken, és a (2) képletből következik, hogy a Rayleigh-hossz négyzetesen csökken. Az (1) képletet elemezve, ha a lézernyalábot x -szeresére tágítjuk, akkor elvben a foltméret $1/x$ függvény szerint csökken, és a (2) képletből következik, hogy a Rayleigh-hossz $1/x^2$ függvény szerint csökken. Azért elvben, mert rövidebb fókuszu fókuszálólencsét használva nő a szférikus aberráció, romlik a nyalábtérjedési tényező, tehát d_{f0} és Z_R nem annyira erősen csökken, ugyanez történik a nyalábtágító beépítése esetén is, ezeket Harp cikke [2] elemzi.

Hol van ezeknek a tényezőknek a szerepe? Mivel kisebb a foltméret, annál koncentráltabb az energia, így nagyobb megmunkálási sebességet lehet elérni, de mivel kisebb a Rayleigh-hossz, ezért csak vékonyabb anyagokat lehet megmunkálni. Ha csövek vágásáról van szó, melynek egyik alkalmazása a koszorúér-tágító sztentek vágása, akkor úgyszólván a falvastagság, tehát használhatunk kis foltméretet, és ebben az esetben a kis Rayleigh-hossznak az lesz az előnye, hogy a megmunkálással ellentétes csőoldalon defokuszba kerül a lézer, tehát szétterül, s így nem lesz vagy kevéssé lesz hő okozta átalakulás a cső

szemközti falában (3. ábra).

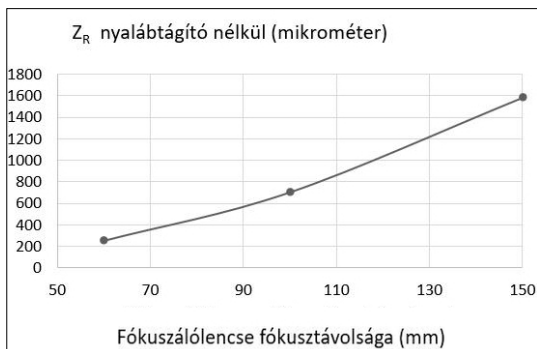
Azonos rezonátor esetén a különböző lencsék cserélgetésének hatását jól bemutatja Harp cikke [2]. Harp IPG gyártmányú, 300 W-os, folyamatos üzemű, ytterbium szállézer rezonátorát használja, először nyalábtágító nélkül cserélgeti a fókuszáló lencsét – rendre 60, 100, 150 mm fókuszút kipróbálva –, így a fókuszált lézernyaláb foltmérete 18,9 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 48,7 mikrométerig (150 mm-es fókuszá-



3. ábra. Fókuszált lézernyaláb hosszmeteszete cső vá-gásakor

2. táblázat. Harp cikkében megadott adatok és az általunk kiszámolt eredmények

| f (mm) | d_{f0} (mm) | B_e | Z_R (mm) | M^2 |
|----------|---------------|-------|------------|-------|
| 60 | 18,99 | 1 | 253,19 | 1,04 |
| 100 | 31,65 | 1 | 703,31 | 1,04 |
| 150 | 47,47 | 1 | 1582,45 | 1,04 |
| 60 | 11,08 | 4 | 36,93 | 2,43 |
| 100 | 9,36 | 5 | 41,60 | 1,54 |
| 150 | 11,50 | 5 | 76,67 | 1,26 |



4. ábra. A Rayleigh-hossz változása a fókuszáló lencse fókusz távolságának függvényében nyalábtágító nélkül

lólencsénél) változik. Kiszámoltuk a Rayleigh-hosszokat: ezek 253 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 1582 mikrométerig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változnak (4. ábra). A nyalábtovábbító szaloptika átmérője 9 mikrométer volt, a lézersugárzás hullámhossza pedig 1075 nm, amit mikrométerben érdemes a képletekbe helyettesíteni. A fókuszált nyalábkérszmetset adatait a kiszámolt Rayleigh-hosszokkal a 2. táblázat, a kísérlet és a lézerberendezés adatait pedig a 3. táblázat tartalmazza.

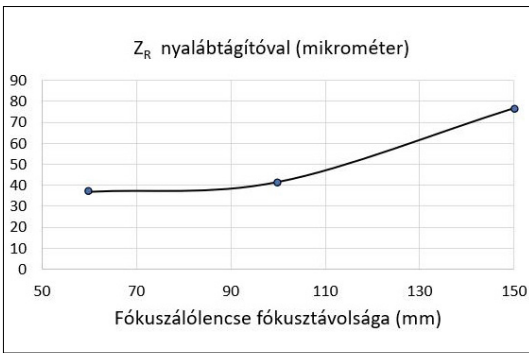
A cikkben még jelentősebb a fókuszált lézernyaláb paramétereinek változása egy ötszörös nyalábtágító behelyezése esetén. Így a fókuszált lézernyaláb foltmérete 9,36 mikrométertől (100 mm-es fókuszáló lencsénél) 11,5 mikrométerig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változik. Tehát kb. feleakkora a fókuszfoltméret nyalábtágítóval, mint nyalábtágító nélkül legkisebb elérhető értéként. Meg kell jegyezni, hogy a 60 mm-es fókuszáló lencsénél csak 4-szeres nyalábtágítást tett lehetővé a lencse szabad keresztmetszete. Kiszámoltuk a Rayleigh-hosszokat: ezek 36,9 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 76,7 μm-ig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változnak (5. ábra). Tehát akár hatodakörára le lehet csökkenteni a Rayleigh-hosszat nyalábtágítóval, mint a nélkül.

A kollimátor lencse fókusz távolságát, mely hiányzó adat a cikkből, a (4) képletet fc_{oll} -ra rendezve (8) 28,4 mm-re jött ki minden optikai elem esetén, amit a cikkben kipróbáltak.

Harp cikkének [2] különlegessége, hogy a lézer elé ferdén elhelyezett Al-7075 T6 anyagon hegeszt

3. táblázat. A kísérlet és a lézerberendezés egyéb adatai

| Paraméter | Érték |
|--|--|
| d_{fc} (mm) | 9 |
| l (mm) | 1,075 |
| d_b (mm) Tágítatlan nyalábtátmérő | 4,5 |
| Lézerberendezés-gyártó | IPG |
| Lézerberendezés típusa | 300 W, CW, ytterbium szállézer |
| Megmunkált anyag | Al-7075 T6 |
| Vastagság, geometria | Lemez tetején varratok |
| Cél | Fókuszközeli Lézernyaláb-kérszmetset meghatározása |
| Művelet | Hegesztés |



5. ábra. A Rayleigh-hossz változása a fókuszálólencse fókusz távolságának függvényében nyalábtágítóval

tési varratsorozattal határozta meg a fókuszolt átmérőjét és a nyalábterjedési tényezőt a lézerfejben lévő optikai elemek cserélgetése során.

Baumeister 2006 cikkében [6] a következő adatokat találjuk: a fókuszoltátmérő 20 μm , a lézersugárzás hullámhossza 1090 nm, a nyalábminőség tényező 1,1, a fókuszálólencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője 5 mm, nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1. Ennek alapján az (1) képletet a fókuszálólencse fókusz távolságára rendezve (5):

$$f = \frac{d_{f0} B_e d_b \pi}{4 \lambda M^2} \quad (5)$$

$f = 65,5$ mm adódik. Vegyük észre, hogy a fókuszoltátmérő (1) képletét csak $f/(B_e d_b)$ -el kell szorozni, hogy megkapjuk a (2) képletből a Rayleigh-hosszat, tehát (6):

$$Z_R = \frac{f}{B_e d_b} \quad (6)$$

Így Z_R 262 mikrométernek jön ki. Mivel csak egy szálátmérő van megadva, mely valószínűleg a rezonátor optikai szál átmérője, ezért a kollimátor fókusz távolsága nem számítható ki. A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 2. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a **5. táblázat** 2. oszlopa tartalmazza.

Sobih [7] cikkében a fókuszoltátmérő 73 μm , a fókuszálólencse fókusz távolsága $f = 190,5$ mm, a lézersugárzás hullámhossza 1090,5 nm, a nyalábminőség tényező 1,1, nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1. Ennek alapján az (1) képletből adódik a fókuszálólencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője (7):

$$d_b = \frac{4 \lambda M^2 f}{B_e d_{f0} \pi}, \quad (7)$$

amely 3,9 mm, majd ennek felhasználásával a (6) képletből a Rayleigh-hossz közelítőleg

4. táblázat. A szállérezek adatai, kiszámított értékek sötét cellákban

| Cikk | Baumeister 2006 [6] | Sobih 2007 [7] | Guerra 2019 [8] | Meszlényi 2019 [9] |
|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| d_{f0} (mm) | 20 | 73 | 150 | 14 |
| d_{fc} (mm) | n.a. | 14 | 150 | 50 |
| f (mm) | 65,5 | 190,5 | 50 | 50 |
| f_{coll} (mm) | n.a. | 36 | 50 | 50 |
| l (mm) | 1,09 | 1,07 | 1,08 | 1,07 |
| M^2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| d_b (mm) | 5 | 3,9 | 0,5 | 5,4 |
| Z_R (mm) | 262 | 3554 | 14867 | 131 |

5. táblázat. A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

| Cikk | Baumeister 2006 [6] | Sobih 2007 [7] |
|--|--|---------------------------------------|
| Lézerberendezésgyártó | SPI | IPG |
| Lézerberendezéstípus (mindegyik szállézer) | SP-100 C egymódusú 100 W | YLR- 1000-SM ytterbium 1 kW egymódusú |
| Megmunkált anyag | 1.4301 | EN 43 lágyított acél |
| Vastagság, geometria | 100–300 μm fólia | 1 mm-es lemez |
| Művelet | Fóliavágás | Lemezvágas |
| Cél | Kis vágási rés: 20 μm elérése | Bordázottságmentes vágási élt ért el |

6. táblázat. A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

| Cikk | Guerra 2019 [8] | Meszlényi 2019 [9] |
|--|-----------------------|--|
| Lézerberendezésgyártó | Rofin | IPG |
| Lézerberendezéstípus (mindegyik szállézer) | FL x50s | YLR-150/1500-QCW-AC-Y11 |
| Megmunkált anyag | 316 rozsdamentes acél | Réz- és ezüsfólia |
| Vastagság, geometria | cső | 50 μm rézfólia, 150 μm ezüsfólia |
| Művelet | Vágás | Fúrás |
| Cél | Szentvágás | Erősen reflektáló anyagok fúrásának vizsgálata |

3,5 mm-re adódik. Mivel adott a lézertovábbító optikai szál magátmérője is, mely 14 mm, a (3) képletből a kollimátor lencse fókusz távolsága számolható ki (8), 36 mm-re jön ki.

$$f_{coll} = \frac{d_{fc} f}{d_{f0}} \quad (8)$$

A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait az **5. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza.

Guerra [8] cikkében adott a nyalábvezető optikai szál átmérője: 150 mikrométer és a kollimátor lencse fókusz távolsága, mely 50 mm, valamint a fókuszáló lencse fókusz távolsága, mely 50 mm, így a (3) képletből a fókuszfoltátmérő 150 mikrométerre adódik. Ennek és a **4. táblázat**ban adott hullámhossz és nyalábminőségi tényező alapján a (6) képletből a Rayleigh-hossz számolható ki, mely közelítőleg 15 mm-re adódik (nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1). Az eddig megadott adatokból, a (7) képletből adódik a fókuszáló lencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője, mely 0,5 mm. A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 4. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a **6. táblázat** 2. oszlopa tartalmazza.

Meszlényi [9] cikkében a lézervezető optikai szálátmérője: 14 μm , a kilépő nyalábot tágító és párhuzamosító kollimátor lencse fókusz távolsága: 50 mm. A párhuzamos lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága: 50 mm (f). A nyalábtágító állása 1-es volt, így a nyalábtágítási faktor (B_e) szorzótényezője 1, így a (4) képletből a fókuszfoltátmérő 14 mikrométerre adódik. Ennek és a **4. táblázat**ban adott hullámhossz és nyalábminőségi tényező alapján a (7) képletből a fókuszáló lencse előtti nyalábtátmérő 5,4 mm-re adódik. Végül a (6) képletből a Rayleigh-hossz számolható ki, mely közelítőleg 131 μm -re adódik. A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 5. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a **6. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza.

Az összes elemzett cikknél a megmunkált anyagvastagság a fókusz mélységen belül volt, tehát a kétszeres Rayleigh-hosszon belül helyezkedett el.

3. Következtetések

Cikkünkben bemutattuk az anyagmegmunkáló szállérezek tudományos publikációkban hiányzó

adatainak meghatározási módszerét, mely a szakirodalomban különböző helyeken megtalálható képletek együttes alkalmazásával történik. Ezek az adatok a nyalábvezető optikai szál kimenetétől a fókuszfoltig meghatározzák a nyalábformáló optikai rendszert, mely a megmunkálófejben van elhelyezve, és a **4. táblázat**ban szereplő 8 adatból maximum 3 hiányzó adat kiszámítását teszi lehetővé.

Munkánkban az egyes cikkekből különböző mintázat szerint hiányzó tényezők – ilyen a fókuszáló lencse fókusz távolsága, a kollimátor fókusz távolsága, a párhuzamosított nyaláb átmérője, a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz kiszámolása – vált lehetővé. Elemeztük a megmunkálófejben elhelyezkedő optikai elemek tulajdonságváltozásainak hatását a fókuszfoltátmérőre és a Rayleigh-hosszra.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kaplan A. F.: *Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting*. Shaker Ver. Aachen, 2002.
- [2] Harp W. R., Paleocrassas A. G., Tu J. F.: *A Practical method for determining the beam profile near the focal spot*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 37/11–12. (2008) 1113–1119.
<https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>
- [3] Formulary. (accessed on Aug. 11, 2022).
<https://www.silloptics.de/en/service/sill-technical-guide/laser-optics/formelsammlung>
- [4] VanGemert R., Schoenly J., Sarrafi R., Mendes M.: *Fiber laser micromachining in high-volume manufacturing*. Industrial Laser Solutions, May, 2015.
- [5] Tu J. F., Paleocrassas A. G.: *3 Low speed laser welding of aluminium alloys using single-mode fiber lasers*. In: (szerk.: Xiaodong Na, Stone) *Laser Welding*, Ed. Rijeka, Croatia: SCIYO, 2010. 47–106.
<https://doi.org/10.5772/9857>
- [6] Baumeister M., Dickmann K., Hoult T.: *Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets*. Applied Physics A volume 85/2. (2006) 121–124.
<https://doi.org/10.1007/s00339-006-3687-9>
- [7] Sobih M., Crouse P. L., Li L.: *Striation-free fibre laser cutting of mild steel sheets*. Applied Physics A 90/1. (2008) 171–174.
<https://doi.org/10.1007/s00339-007-4247-7>
- [8] Guerra A. J., Ciurana J.: *Minimum Quantity Lubrication in Fibre Laser Processing For Permanent Stents Manufacturing*. Procedia Manufacturing, 41. (2020) 492–499.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.036>
- [9] Meszlényi G., Bitay E.: *The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials*. Acta Materialia Transylvanica, 2/1. (2019) 61–68.
<https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-10>