



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉSTERVEZET

MESZLÉNYI GYÖRGY JÓZSEF

A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás technológiai és biztonságtechnikai elemzése

Témavezető: Bitay Enikő

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2025 március 3.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	4
A tudományos problémák és célkitűzések	5
A kutatási módszerek	6
1 A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE	7
1.1 A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás alkalmazásai	7
1.2 A lézersugárzás keltése	8
1.3 A lézersugárzás jellemzői.....	8
1.4 A lézeres vágás biztonságtechnikai elemei, a lézeres gyártás biztonságának szabályozása	9
1.4.1 Nemzetközi szabványok:.....	10
1.4.2 Európai Unió irányelvek.....	11
1.4.3 Jogszabályok	12
2 A NAGY PONTOSSÁGÚ LÉZERES VÁGÁS TERÜLETE ÉS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI	13
2.1 A vágásifolt-átfedés definíciója és képlete.....	14
2.2 Az egységnyi megolvasztott térfogatra jutó energia kiszámítása	17
3 A FÓKUSZÁLT LÉZERNYALÁB JELLEMZŐI ÉS A NYALÁBMINŐSÉG TÉNYEZŐ	19
3.1 A szállézerek optikai adatai a nyalábvezető szál végétől a fókuszfoltig.....	22
3.2 Sztentek és azok lézeres vágása	28
3.2.1 A sztentek	28
3.3 A lézeres fúrás szakirodalma.....	31
4 A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE.....	32
4.1 A kísérletekhez használt Corina lézerrendszer ismertetése.....	32
4.2 A kísérletekhez használt szállézerrendszer ismertetése	32
4.3 A felhasznált anyagok jellemzése	35

4.4	A kísérletek kiértékeléséhez használt mikroszkópok és képelemző programok.....	37
•	DYNO LITE EDGE USB MIKROSKÓP DYNO CAPTURE KÉPELEMZŐ PROGRAMMAL.....	38
	A KÍSÉRLETEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK.....	38
4.5	Sztentgyártási csövek vágási kísérletei a szakirodalmi elemzéssel	38
4.5.1	A szakirodalomban található Nd:YAG lézeres sztentvágás adatainak elemzése 38	
4.5.2	Saját Nd:YAG lézeres sztentvágás adatainak elemzése.....	40
4.5.3	A szakirodalomban található szállézeres sztentvágás adatainak elemzése	42
4.5.4	Az ultrarövid: ps-os és fs-os impulzust használó lézerekről szóló cikkek elemzése 44	
4.6	A vágási minőség értékelése és termékbiztonság a lézeres sztentgyártásnál.....	46
4.7	Az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatának elemzése rozsdamentes acél fólia fúrása esetén	51
4.8	Az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatának elemzése vörösréz fólia fúrása esetén 61	
4.9	A nyalábminőségi tényező romlásának becslése.....	67
4.10	Összegzett következtetések	74
	Új tudományos eredmények.....	74
	Ajánlások.....	76
	A kutatási eredményeimet ismertető publikációk jegyzéke	78
	IRODALOMJEGYZÉK.....	81
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	87
	TÁBLÁZATJEGYZÉK	89
	ÁBRAJEGYZÉK	90
	FÜGGELÉK.....	92
4.11	A szakirodalomban használt angol szakkifejezések magyar megfelelői	93
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	95

BEVEZETÉS

2006-ban kezdtem el a kutatómunkát a Pattantyús Ábrahám Géza doktori iskolában, a BME-n. Témavezetőm Dobránszky János volt, eredeti témám a koszorúér-tágító sztentek lézeres vágása volt, mely témakörben, a vékony falú csövek lézeres vágásából több tudományos közleményem született. Az e cikkekben közölt kutatási eredményeimet is belefoglaltam az értekezésembe, és elemeztem, hogy miként kapcsolódik ezek a biztonság tudomány területéhez, hiszen a kutatómunkát 2016 óta az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola keretei között végzem, Bitay Enikő témavezetésével.

A koszorúér-tágító sztentek az infarktusban elzáródott szív koszorúerek újbóli megnyitására szolgálnak, szakirodalmi adatok szerint az időben műtőbe kerülő emberek életét több évvel meghosszabbíthatják. Ha tágabban értelmezzük a biztonságot, az emberi egészség helyreállítására, a betegséggel szembeni biztonságra is lehet vonatkoztatni. A sztent egy olyan orvostechnikai eszköz, mely ezt a biztonságot szolgálja.

Az első kutatási időszakomat követő években rozsdamentes acél, réz és ezüst anyagú fóliák egyimpulzusos lézeres fúrásának folyamatait elemeztem, a nyalábminőségi tényező romlásának becslésével és a szállézeres sugármenetének pontos jellemzéséhez szükséges, de hiányzó adatok meghatározási módszerének, kiszámolásának kidolgozásával foglalkoztam.

A lézeres megmunkálásnál fontos szempont a lézereket kezelő szakemberek védelme, ez egy különösen fontos biztonságtechnikai területe a megmunkálásnak. A lézeres megmunkálógépek mind a legveszélyesebb 4. lézer veszélyesség osztályba tartoznak [1], hiszen a megmunkálás elvégzéséhez nagy energiakonzentrációra van szükség, ami még az általam vizsgált lézerekkel végzett, úgynevezett mikromegmunkálásokra is igaz. A lézersugárzás elleni védelemről egy sor nemzetközi szabvány, Európai Unió direktíva és egy Egészségügyi Minisztériumi rendelet [2] rendelkezik.

A tudományos problémák és célkitűzések

- A precíziós lézeres megmunkálás biztonságtechnikai elemzése.
- A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozíciókban létrehozható furatok szabályozott előállítására alkalmas, kísérleti eszköz fejlesztése.
- Az egyimpulzusos lézeres fűrés folyamatának elemzése ausztenites rozsdamentes acél fólián és rézfólián végzett kísérletekkel.
- A nyalábminőségi tényező romlása alsó határának becslése Nd:YAG lézereknél.
- Az anyagmegmunkáló szállézerekre a tudományos publikációkban hiányosan közölt, a nyalábvezető száltól a fókuszfoltig terjedő adatok meghatározási módszerének kidolgozása.
- Az impulzusos üzemű lézeres vágás egyes beállítási és fontos működési paraméterei nem függetlenek egymástól, ezért célul tűztem ki, hogy a tudományos cikkekben az erre vonatkozóan hiányzó adatait meghatározzam, a meghatározásukra új módszert dolgozzak ki.
- Átfogó értékelési rendszer kidolgozása a lézeres sztentvágás potenciális hibáinak biztonság alapú számszerűsítésére. A sztentgyártás optimalizálására alkalmas biztonsági szempontrendszer kidolgozása.
- A lézeres vágási paraméterek és a sztentek funkcionális biztonsága összefüggésrendszerének kidolgozása.

A kutatási módszerek

A precíziós lézeres vágás és fúrás területen érvényes szabványok, Európai Unió direktívák, magyar rendelet megvizsgálása.

Fémfóliák lézeres fúrása terén, a különböző fókuszpozícióban készíthető furatok tanulmányozásához kísérleti eszköz tervezése és gyártása. Az egyimpulzusos lézersugaras fúrás folyamatának elemzése rozsdamentes acél fólia fúrása esetén. Az egyimpulzusos lézersugaras fúrás folyamatának elemzése vörösréz fólia fúrása esetén.

Sztentgyártási csövek lézeres vágására. Az egységnyi megolvasztott térfogatra jutó energia kiszámítása.

Nd:YAG lézereknél a nyalábminőségi tényező romlása alsó határának becslése.

Az anyagmegmunkáló szállézerekre a tudományos publikációkban hiányos, a nyalábvezető száltól a fókuszfoltig terjedő adatok meghatározása.

Az impulzusos üzemű lézeresvágásnál a tudományos cikkekből egyes, hiányzó adatainak meghatározása.

A vágási minőség értékelése és termékbiztonság a lézeres sztentgyártásban.

1 A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

1.1 A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás alkalmazásai

A lézeres precíziós vágás egyik fontos alkalmazási területe a koszorúértágító sztentek gyártása. A sztentek fejlesztése folyamatos a geometria, az anyag és a megmunkálás terén. A flexibilitás (CAD-CAM rendszer) és a pontosság terén ma nincs alternatívája a lézeres gyártásuknak (bár jönnek az additív gyártók). A BME-n, gépészkari doktoranduszként sztentek lézeres vágására végeztem kísérleteket; a publikációim első fele ezen a területen született.

A lézeres precíziós vágás más alkalmazásai:

- NYÁK-re történő forrasztópaszta-adagoláshoz stencil kivágása rozsdamentes acél fóliából.[3]
- Hibrid NYÁK integrált áramköröknél az ellenállás értékének beállítása Nd:YAG lézerrel folyamatos mérés mellett (trimmelés). Az ellenállás egyik anyaga ez esetben tantál-nitrid vagy tantál. [4]
- Órarugók kivágása karórákhoz [5]

A precíziós lézeres fúrás alkalmazásai [5]

- Lézeres fúrással, fémbe munkált furatokkal létre lehet hozni szűrőket, szitákat élelmiszeripari alkalmazásokhoz, maszkokat.
- Üzemanyag-befecskendező nyílás készítése.
- Kenőanyag célba juttatásához furat létrehozása.
- Fémcsatlakozók gyártásakor a csatlakozó töréséhez 45 fokos zsákfuratok készítése.
- Sebészeti tű végébe zsákfurat a varrósál rögzítéséhez.

Egyéb alkalmazások [6]:

- Kalibrált áramlásifuratok létrehozása.
- Inhalátorokban folyékony gyógyszer porlasztásához furatok készítése.
- Tintasugaras nyomtatókban használt fúvókák furatainak létrehozása.

1.2 A lézersugárzás keltése

Albert Einstein 1917-ben tette közzé azt a gondolatát, hogy a gerjesztett részecskék (atomok, molekulák) nemcsak spontán módon bocsáthatják ki a gerjesztett állapotukat jellemző többlet energiájukat vagy annak egy részét, hanem megfelelő késztetés (stimuláció) hatására is. Ezt a jelenséget nevezték el stimulált emissziónak. Évtizedek teltek el úgy, hogy ebben a témában látszólag semmi nem történt. Valójában erre az inkubációs időre volt szükség ahhoz, hogy az első lézersugárzás 1960-as felvillanásához szükséges ismeretek összegyűljenek. Ebben az időszakban nagyon sokat tudtunk meg az atomok szerkezetéről. 1960-ban már tudtuk, hogy a lézersugárzás keletkezéséhez, vagyis a fény stimulált emissziós erősítéséhez milyen technikai feltételekre van szükség: lézermédium, annak megfelelő gerjesztése (populációinverzió), megfelelő nyitó- és zárótükör. Ettől a pillanattól az események elképesztő ütemben gyorsultak. A lefektetett fizikai alapok azonban az évtizedek alatt mit sem változtak. A lézersugárzás létrejöttéhez ma is ugyanazokra az elemi feltételekre van szükség, mint az első felvillanás alkalmával, legyen szó a legkisebb vagy legnagyobb teljesítményű sugárforrásról, vagy a folyamatos és az impulzusos üzeműről [7].

1.3 A lézersugárzás jellemzői

a) Hullámhossz

Függ a lézerműködésben résztvevő átmenetek energiakülönbségétől és a rezonátor méreteitől. Típusonként változó, egy típuson belül a hullámhosszat – esetleg a hullámhosszakat – az szabja meg, hogy a lézeraktív anyag elektronjainak milyen energiaszintek között valósítható meg a populációinverzió. A hullámhossztartomány az ultraibolya tartománytól (pl. F₂-lézer- 152 nm) a távoli infravörös tartományig tart (CO₂ - 10,6 μ m), azonban a kísérleti célokból megépített lézerek ennél nagyobb tartományt fognak át (H₂-lézer 110 nm, metanol lézer ~37–1000 μ m.). [8]

b) Monokromatikusság, egyszínűség

A lézersugárzás spektruma ideális esetben egyetlen vonalból áll, melynek szélessége, a sávszélesség, igen kicsiny, azaz a lézerek nagy többsége egyszínű fényt bocsát ki. Ez annak tulajdonítható, hogy az stimulált emisszió azonos hullámhosszú és energiájú fotonokat eredményez, és az optikai rezonátor szigorúan olyan hullámhossznak kedvez, melyre nézve teljesül a longitudinális módusokra a rezonancia feltétele. [8]

c) Divergencia, széttartóság

A lézerek többsége igen párhuzamos a sugárnyalábja, azaz a nyalábkeresztmetszet a lézerforrástól messzebb sem haladja meg jelentősen a kilépési értéket. Ez a rezonátor hatásának fentebb már tárgyalt egyik következménye. A divergenciát a sugárnyaláb nyílásszögének mértékével szokták jellemezni. A nagyobb rezonátorhosszal és a nagy reflexiójú rezonátor tükrökkel rendelkező lézerek jellemzően kisebb divergenciával rendelkeznek. Ennek megfelelően, míg egy 1 m-es He-Ne lézer divergenciája mrad nagyságrendű, addig egy dióda-lézer, melynek rezonátorhossza $\sim 100\ \mu\text{m}$, a széttartás elérheti a 45° -ot is. [8]

d) Módusszerkezet

A rezonátoron belül a kialakult elektromágneses tér a peremfeltételeknek megfelelően bizonyos megengedett konfigurációk (módusok) felvételére kényszerül. Két típusát különböztethetjük meg, a transzverzális és a longitudinális módusokat. A legkedvezőbb az ún. TEM_{00} (transzverzális alapl módus) módus (TEM: Transverse Electromagnetic Mode). Ekkor az intenzitásprofil keresztmetszete Gauss-görbe alakú: a rezonátortengelyben maximális, a szélek felé a sugárzás négyzetével exponenciálisan csökken. [8] Jelen értekezésben használt lézerek (mikromegmunkálásra kifejlesztett Corina Nd:YAG lézerrendszer, és az IPG gyártmányú YLR-150/1500-QCW-AC-Y11 szállólézer mind TEM_{00} közeli módusszerkezetűek.

e) Koherencia

A koherencia kifejezést az egyes hullámrészek fáziskapcsolatának jellemzésére használják. Ha egy sugárzási nyaláb koherens, akkor például egy féligáteresztő tükörrel előállított két részének egyesítésekor interferenciajelenség áll elő. A növekvő sávszélesség csökkenti a sugárzás koherenciáját. [8]

1.4 A lézeres vágás biztonságtechnikai elemei, a lézeres gyártás biztonságának szabályozása

A lézeres gyártás – jelen esetben a fúrás és vágás – biztonsága honosított nemzetközi szabványok, Európai Unió direktívák és Egészségügyi Minisztériumi rendelet által részletesen szabályozott terület. Mivel a lézeres megmunkálás „veszélyes üzem” az értekezésben mindenképpen tárgyalni kívánom ezeket. Az előírásokat két csoportra lehet osztani: egy részét a lézerberendezés gyártójának, egy másik részét az üzemeltetőjének kell betartani. Az első

csoportra egy példa a lézerberendezés használati utasítása, a második csoportra pedig a lézert kezelők megfelelő képzése.

1.4.1 Nemzetközi szabványok:

Ezen a területen az összes szabvány egyszerre nemzetközi és magyar szabvány.

Lézeres megmunkálógépekre vonatkozó szabvány:

MSZ EN ISO 818-1:2020/A11:2021 Gépek biztonsága. Lézeres megmunkálógépek. 1. rész: Lézerbiztonsági követelmények, a 2. részt nem sorolom fel itt, mert az kézi lézeres megmunkálógépekre vonatkozik, én ilyenén nem kísérleteztem.[9]

Lézergyártmányokra vonatkozó szabványok:

MSZ EN 60825-1:2015 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények) Lézerbiztonsági osztályok felsorolása is ebben található [1]

MSZ EN 60825-4:2006/A2:2011 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 4. rész: Lézervédelmek [10]

IEC TR 60825-14: 2004. Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírása. 14. rész: Felhasználói útmutató [11]

MSZ EN ISO 11252:2013 Lézerek és lézerberendezések. Lézerkészülékek. A dokumentáció minimumkövetelményei [12]

Védőernyőkre, szemvédőkre vonatkozó szabványok:

MSZ EN 12254:2010 Lézermunkahelyek védőernyői. Biztonsági követelmények és vizsgálat [13]

MSZ EN ISO 19818-1:2021 Szem- és arcvédelem. Lézersugárzás elleni védelem. 1. rész: Követelmények és vizsgálati módszerek [14]

MSZ EN 207:2017 Személyi szemvédő eszközök. Szűrők és szemvédők lézersugárzás ellen [15]

MSZ EN 208:2010 Személyi szemvédő eszközök. Szemvédők lézerek és lézerrendszerek beállítási munkáihoz (lézerbeállítási szemvédők) [16]

Sok, nem lézerspecifikus szabvány és előírás vonatkozik erre a területre, ezek nagy része kockázatértékelési szabvány:

MSZ EN 61508-1:2010 Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága. 1. rész: Általános követelmények [17] ez egy nyolc részes szabvány, mivel nem készítettem elemzéseket ezen szabvány alapján, itt nem sorolom fel a részeit.

MSZ EN IEC 62061:2021 Gépek biztonsága. A biztonsággal összefüggő vezérlőrendszerek működési biztonsága [18]

MSZ EN ISO 13849-1:2016 Gépek biztonsága. Vezérlőrendszerek biztonsággal összefüggő részei. 1. rész: A tervezés általános alapelvei [19] Ez is két részes szabvány.

MSZ ISO 31000:2018 Kockázatmenedzsment. Irányelvek [20]

MSZ EN ISO 12100:2011 Gépek biztonsága. A kialakítás általános elvei. Kockázatfelmérés és kockázatcsökkentés [21]

1.4.2 Európai Unió irányelvek

(89/391/EGK) a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítását ösztönző intézkedések bevezetéséről [22]

AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2006/25/EK IRÁNYELVE (2006. április 5.) a munkavállalók fizikai tényezők hatásának való expozíciójára (mesterséges optikai sugárzás) vonatkozó egészségügyi és biztonsági minimumkövetelményekről (19. egyedi irányelv a 89/391/EGK irányelv 16. cikke (1) bekezdésének értelmében) [23]

Nem kötelező érvényű útmutató a 2006/25/EK irányelv végrehajtása során alkalmazható legjobb gyakorlatokhoz (Mesterséges optikai sugárzás) 150 oldal [24]

AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2016/425 RENDELETE (2016. március 9.) az egyéni védőeszközökről és a 89/686/EGK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről (EGT-vonatkozású szöveg) [25]

Részletezés:

AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2006/25/EK IRÁNYELVE [23]

(2006. április 5.) a munkavállalók fizikai tényezők hatásának való expozíciójára (mesterséges optikai sugárzás) vonatkozó egészségügyi és biztonsági minimumkövetelményekről (19. egyedi irányelv a 89/391/EGK irányelv 16. cikke (1) bekezdésének értelmében).

2006.8.17. HU Az Európai Unió Hivatalos Lapja C 193 E/213

1.4.3 Jogsabályok

- 22/2010. (V. 7.) EüM rendelet a munkavállalókat érő mesterséges optikai sugárzás expozícióra vonatkozó minimális egészségi és biztonsági követelményekről Hatályos: 2023. 01. 01 [2]
- 23/2024. (XII. 16.) EM rendelet a munkára való alkalmassági vizsgálat kötelező elrendeléséről
- 4/2009. (III. 17.) EüM rendelet az orvostechnikai eszközökről
- 22/2012. (IX. 14.) EMMI rendelet az egészségügyi felsőfokú szakirányú szakképesítés megszerzéséről
- 156/2017. (VI. 16.) Korm. rendelet a haditechnikai tevékenység engedélyezésének és a vállalkozások tanúsításának részletes szabályairól

2 A NAGY PONTOSSÁGÚ LÉZERES VÁGÁS TERÜLETE ÉS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI

Az értekezésben az impulzusos üzemű lézeres mikromegmunkálással, ezen belül vágással és fúrással foglalkozok.

Szeretném ezt a területet elhatárolni a következőktől az egyértelmű azonosítás miatt, ez a terület különbözik:

- A lézeres hegesztéstől, mert az anyagegyesítés.
- Az általános lézeres megmunkálástól, mert most az anyagvastagság néhány század mm-től 1 mm-ig terjed.
- A lézeres nanomegmunkálástól, ahol ennél kisebb méretek vannak és jellemzően a félvezetőiparban használják

Az impulzusos üzemű lézerrel végzett lézeres vágás beállítási paraméterei nem függetlenek egymástól, ami lehetőségeket ad arra vonatkozóan, hogy a cikkek egyes hiányzó adatait kiszámoljuk: így a különböző cikkek adatai jobban összevethetőek, és a kísérletek megismételhetőek lesznek, melyek hasznos alapot jelentenek egy technológia továbbfejlesztéséhez. A lézeres precíziós megmunkálás adatainak rendszerét az értekezés végén található 19. táblázat tartalmazza.

Nézzük sorra ezeket az egyszerű képleteket:

$P_{av}(W) = E_i(mJ)f_i(kHz)$	1. egyenlet [26]
-------------------------------	------------------

Tehát az átlagteljesítmény egyenlő az impulzusenergia és az impulzusfrekvencia szorzatával, itt a millijoule mértékegység miatt lenne 1000-rel osztás, és a kHz miatt 1000-rel szorzás, ezek kiegyeszerűsítődnek (1. egyenlet).

$v \left(\frac{mm}{s} \right) = D_{BT}(\mu m)f_i(kHz)$	2. egyenlet
---	-------------

Most definiálom az impulzusok közti távolság (D_{BT}) fogalmát: a munkadarabot érő két egymást követő impulzus közepének távolsága.

Tehát a vágási sebesség az anyagon mért impulzusok közti távolság és az impulzusfrekvencia szorzata. Itt a mikrométer mértékegység miatt lenne 1000-rel osztás, hogy mm-be konvertáljuk, és a kHz miatt 1000-rel szorzás, ezek kiegyeszerűsödnek (2. egyenlet)

$P_i(W) = \frac{E_i(mJ)}{t_i(ms)}$	3. egyenlet [27]
------------------------------------	------------------

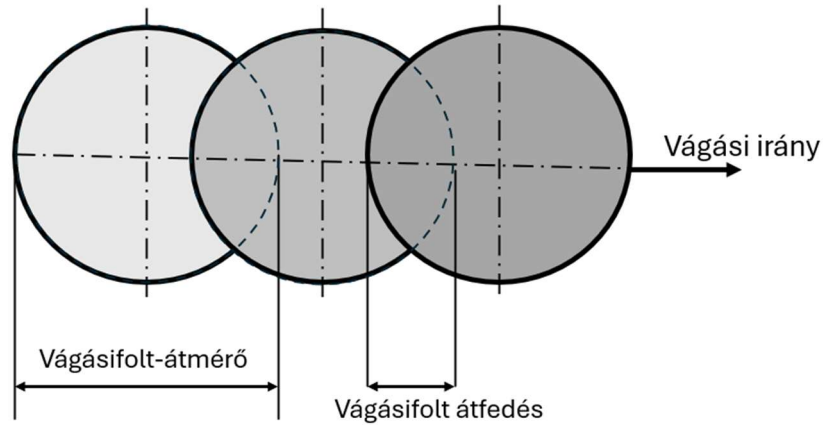
A 3. egyenlet szerint az impulzusteljesítmény az impulzusenergia és az impulzusidő hányadosa. Itt a milli prefixumok esnek ki.

2.1 A vágásifolt-átfedés definíciója és képlete

Az impulzusos üzemű lézeres vágás anyagra tett hatását néhány fontos technológiai paraméter jellemzi: az impulzusenergia, az impulzusidő, és a vágási sebesség és az impulzusfrekvencia együttes hatásából adódó impulzusok közti távolság, valamint az egységnyi térfogatra jutó energia kétféle értelmezése, amit később ismertetek. Az sem mindegy, hogy mekkora a vágási folt átmérő: ennek alapján lehet vágásifolt-átfedést, számolni, minél kisebb a vágási-folt átfedés, annál közelebb esnek egymáshoz az anyagra lőtt impulzusok.

A gyakorlatban a lézernyaláb és a munkadarab metszeteként létrejövő vágási foltot, a cikkekben megadott, jobban mérhető vagy a lézerberendezés specifikációjában megadott fókuszfoltátmérővel helyettesítjük.

Muhammad doktori értekezésében közölt [27] ábrából következik, hogy a korábban használt vágásifolt-átfedésre a pulse overlap kifejezést használja a szerző, mely a lineáris koordináta mentén a két egymást követő impulzusnak a vágási foltját tekintve, azoknak a lineáris koordináta mentén értendő átfedését érti (1. ábra). Ezt úgy kell érteni, hogy ha egyhelyben ad le a lézer impulzusokat, akkor a vágásifolt-átfedés 100%, ha pedig az egyik vágási folt kerülete átmegy a következő középpontján, akkor van 50% átfedés. ebből derül ki, hogy nem területi, hanem a vágási irányú x-koordináta mentén megvalósuló átfedést ért alatta. Ha egymást érintik a vágási foltok, akkor pedig 0% az átfedés. A pulse overlap, vagyis az impulzus átfedés azért helytelen, mert az impulzus egy háromdimenziós test, mely időben változó kölcsönhatásba lép a megmunkált anyaggal.



1. ábra
A vágásifolt-átfedés szemléltetése

Muhammad vágásifolt-átfedés (nála: pulse overlap) képletét a 4. egyenlet mutatja.

$PO = \left(1 - \frac{v}{d_{f0}f_i}\right)$	4. egyenlet [27]
---	------------------

Thawari [26] Muhammadnál korábban publikált vágásifolt-átfedés (spot overlap) képletét az 5. egyenlet mutatja. A 4. egyenlet az 5. egyenlet átrendezésével származtatható.

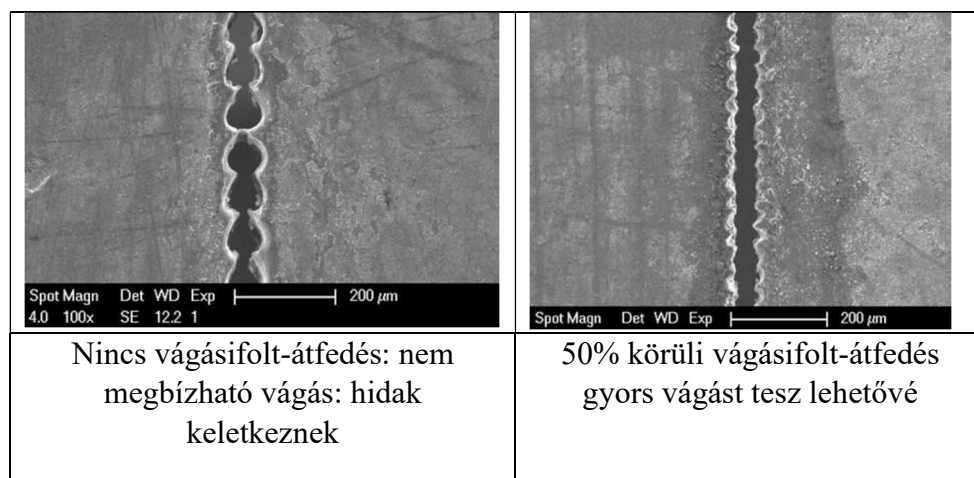
$d_{f0}(1 - PO)f_i = v$	5. egyenlet [26]
-------------------------	------------------

Saját képletemben (6. egyenlet) az impulzusok közti távolság szerepel, ez is megegyezik a fentiekkel, ahol a második egyenletforma a jobban értelmezhető százalékos vágásifolt-átfedést jelenti:

$PO = 1 - \frac{D_{TP}}{d_{f0}} \text{ vagy } PO = \left(1 - \frac{D_{TP}}{d_{f0}}\right) \cdot 100\%$	6. egyenlet
--	-------------

A képletek egyezőségéből következik, hogy mindhárom fogalom ugyanazt jelenti, de mivel a viszonyítási alap a vágási folt átmérője, legjobb vágásifolt-átfedésnek hívni. A

2. ábra mutatja a vágásifolt-átfedést a gyakorlatban:



2. ábra
Vágásifolt-átfedés szemléltetése

Most elemezzük a vágásifolt-átfedés változásának hatását a vágási sebességre vonatkozóan:

Az impulzusfrekvencia limitálja a vágási sebességet: ha nincs vágásifolt-átfedés az anyagon, akkor csak különálló furatok jönnek létre, vagy az impulzusenergia kismértékű változása miatt hidak képződnek (2. ábra bal oldali része).

Ha nincs vágásifolt-átfedés, akkor kiszámolható az elvben elérhető vágási sebesség, például ha 1500Hz az impulzusfrekvencia és 0,024 mm fókuszfoltméret van: az elérhető vágási sebesség maximuma: $1500 \text{ 1/s} \cdot 0,024 \text{ mm} = 36 \text{ mm/s}$ ami a valóságban nem okoz vágást.

A ténylegesen elérhető vágási sebesség ennek fele (50%-os átfedés) = 18 mm/s (2. ábra középső része). Egy korábbi kísérletemnél is e körül volt a maximális vágási sebesség: 15 mm/s-ot értem el [28].

Ez a gondolatmenet csak akkor igaz, ha egy impulzus át tudja fűrni az anyagot. Azonban a kísérleteknél is bebizonyosodott, hogy nagyobb frekvencia és kisebb energia kombinációnál egy impulzus nem fűrja át az anyagot, ezért kisebb az elérhető vágási sebesség, valamint az ultrarövid impulzusidejű (ps, fs) impulzusos vágásnál az anyag egy vékony rétege elpárolog, tehát abláció az anyagmegmunkálás módja, itt 90% feletti vágásifolt-átfedésre van szükség [27], [29], [30].

Ha 100% a vágásifolt-átfedés, akkor egy helyre bocsát ki impulzusokat a lézer, és nincs vágás. A gyakorlatban ennek is lehet alkalmazása a lézeres jelölés egyes változatainál.

2.2 Az egységnyi megolvasztott térfogatra jutó energia kiszámítása

Az egységnyi térfogatra jutó energia kiszámítása a fókuszfoltátmérővel:

Ha 1000 mikrométert elosztjuk az impulzusok közti távolsággal, mely mikrométerben van kifejezve, akkor megkapjuk az 1 mm vágási hosszra jutó impulzusok számát, ezt beszorozva egy impulzus energiájával, megkapjuk az 1 mm vágási hosszra jutó energiát. Most már csak azt a térfogatot kell kiszámolni, amiben eloszlik ez az energia. A térfogatot úgy kapjuk, hogy az 1 mm hosszat beszorozzuk a keresztmetszettel, ami jelen esetben a falvastagság és a fókuszált foltátmérő szorzata. A térfogatot, amivel osztunk az egységnyi – vagyis egy köbmilliméterre jutó energiával úgy kapjuk, hogy az 1 mm hosszat beszorozzuk a keresztmetszettel, ami jelen esetben a falvastagság és a fókuszált foltátmérő szorzata. Itt a milli prefixum kiegyeszeresedik, mert az impulzusenergia mJ-ban van, amit 1000-rel kell osztani a joule-ba való átváltáshoz, a nevezőben az anyagvastagság mikrométerben van, amit szintén 1000-rel kell osztani a mm-re való átváltáshoz, így a számlálóban és a nevezőben található 1000-rel osztás kiesik a képletből. A d_{f0} fókuszfoltátmérő mikrométerben van, amit szintén 1000-rel kell osztani a mm-re való átváltáshoz.

Ez a számítási mód azt feltételezi, hogy a vágási rés átlagos szélessége megegyezik a fókuszfolt szélességével, de a vágási rés szélessége (általában nagyobb, mint a fókuszfoltátmérő (egy korábbi kísérletemnél azonos lézernél $24\ \mu\text{m}$ [31]) így alulbecsülöm a megolvasztott térfogatot, amivel osztok, tehát nagyobb egységnyi térfogatra jutó energiát kapok. Hogy könnyen értékelhető eredményt kapjak, az egységnyi térfogatra jutó energia mértékegysége most J/mm^3 (7. egyenlet).

$E_{V1} = \frac{E_i 1000 \mu\text{m}}{D_{BT} 1\text{mm} a_v \left(\frac{d_{f0}}{1000}\right)}$	7. egyenlet
--	--------------------

Az egységnyi térfogatra jutó energia kiszámítása a vágási rés szélességével:

Ha 1000 mikrométert elosztjuk az impulzusok közti távolsággal, akkor megkapjuk az 1 mm vágási hosszra jutó impulzusok számát, ezt beszorozva egy impulzus energiájával, megkapjuk az 1 mm vágási hosszra jutó energiát. Most már csak azt a térfogatot kell kiszámolni, amelyben eloszlik ez az energia. A térfogatot úgy kapjuk, hogy az 1 mm hosszat beszorozzuk a keresztmetszettel, ami jelen esetben a falvastagság és a vágási rés keresztmetszet felső szélességének szorzata. A 8. egyenletnél ugyanolyan konverziókat kell végezni, mint a 7. egyenletnél. Ez a számítási mód azt feltételezi, hogy a vágási rés átlagos szélessége megegyezik

a vágási rés tetejének szélességével, pedig a vágási rés keresztmetszete általában kúpos, így a vágási rés alja kisebb, mint a teteje, így túl becsüljük a megolvasztott térfogatot, amivel osztunk, tehát kisebb egységnyi térfogatra jutó energiát kapunk. Hogy könnyen értékelhető eredményt kapjunk az egységnyi térfogatra jutó energia mértékegysége most J/mm^3 (8. egyenlet).

$E_{V2} = \frac{E_i 1000 \mu m}{D_{BT} 1 mm a_v(\frac{k_1}{1000})}$	<i>8. egyenlet</i>
---	--------------------

Azért alkalmazok két megközelítést az egységnyi térfogatra jutó energia becslésére, mert a szakirodalomban nincs meg minden adat, valamelyik cikkben csak a fókuszfoltátmérő, másokban csak a vágási rés szélesség, némelyikben mind a kettő meg van adva.

Amit most elhanyagoltam, az a plazmacsővában elnyelt energia, amely így nem jut az anyagba, és a vágási résen túljutó, valamint egyéb hővezetésből és hőszugárzásból elvesző energiák.

3 A FÓKUSZÁLT LÉZERNYALÁB JELLEMZŐI ÉS A NYALÁBMINŐSÉG TÉNYEZŐ

Bevezetés

Lézeres megmunkálásnál 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. Miért fontos tudni, hogy mekkora a fókuszfoltátmérő? Mert kisebb fókuszfoltátmérővel lézeres 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 9. egyenlet [32], [33], [34], [35], [36]:

$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_b}$	9. egyenlet
---	-------------

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 hány-szorosa a fókuszfoltátmérője a vizsgált nyalábnak, 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 faktórával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e), ami megmondja, hogy hány-szorosa lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest 10. egyenlet [32]:

$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_b B_e}$	10. egyenlet
---	--------------

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszsíktól mért az a hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb radiusza 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, ezt nevezzük fókuszmélységnek, tehát ha lézeres vágásról van szó, körülbelül ilyen vastag anyagot

tud átvágni a lézer. Képlete nagyon hasonló a foltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz távolsága és a lencse előtti nyalábátmérő a négyzetben szerepel 11. egyenlet, ha nincs nyalábtágító a rendszerben, akkor a 12. egyenletet kell használni [32], [35]:

$Z_r = \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_b^2 B_e^2}$	<i>11. egyenlet</i>
--	---------------------

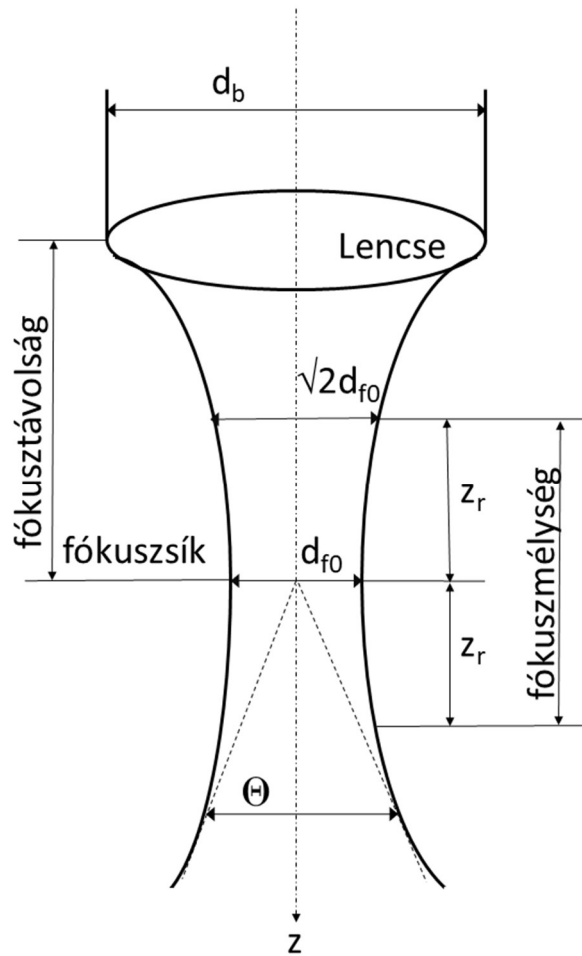
$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{d_b^2 \pi}$	<i>12. egyenlet</i>
--	---------------------

1. ábra. A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése

A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőit az 3. ábra szemlélteti, ahol a z-koordináta a lézernyaláb terjedési irányába mutat, Θ a fókuszált nyaláb széttartási szöge. A 3. ábra a [32] és a [37] szakirodalom ábráinak egyesített jellemzői alapján készült. A nyalábminőséget tárgyalják a következő cikkek: [38], [39], [40], [41].

A nyalábminőség mérőszámai:

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



3. ábra
A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése

A nyalábparaméter szorzat (BPP) a lézernyaláb fókuszálhatóságát fejezi ki, melyet leggyakrabban a rezonátorbeli nyalábderéksugár és a távoli mezői divergenciaszög, Θ_σ szorzataként adnak meg, amit 4-gyel elosztanak. Itt Θ_σ : a táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge 13. egyenlet [36]:

$BPP = \frac{d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{4}$	13. egyenlet
--	--------------

Egy további megadási mód a nyalábminőség tényező, annak a mértéke, hogy mennyire közelíti meg a nyalábparaméter szorzat az ideális Gauss-nyaláb diffrakciós határát 14. egyenlet [36]:

$M^2 = \frac{\pi d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{\lambda}$	14. egyenlet
--	--------------

A harmadik megadási mód a K nyalábterjedési tényező, mely M^2 reciproka: [36].

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.

3.1 A szállézer optikai adatai a nyalábvezető szál végétől a fókuszfoltig

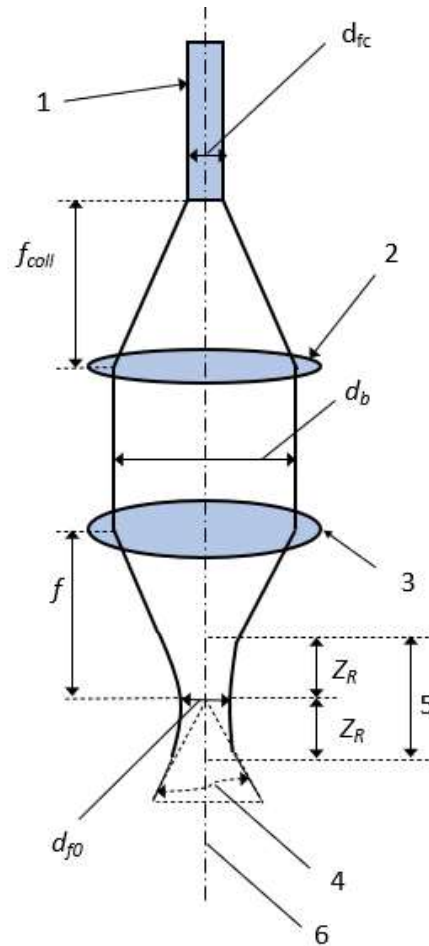
Az értéktől szenteket gyártó szállézer rendszerekről közölt publikációkban sokszor nincs minden technológiai változó megadva, ami a fókuszáltnyaláb-keresztmetszet fontos paramétereinek a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak a meghatározásához szükséges lenne. A szállézereknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást: lézerdiódák adják át az energiájukat a nyitó- és zárótükör funkcióját ellátó, Bragg-rácsal ellátott [27], gerjesztett optikai szálnak. Innen a nyalábtovábbító optikai szál viszi el a sugárzást a fókuszálófejhez. A nyalábtovábbító optikai szálból széttartóan lép ki a nyaláb, ezt párhuzamosítja a kollimátor lencse, a párhuzamos lézernyalábot a munkadarabra koncentrálja a fókuszálólencse. Az értekezésben jellel ellátott mennyiségek jeleit, megnevezéseit, és mértékegységeit a 20. táblázatban találhatók. Korábban ismertettem a fókuszfolt átmérő: 10. egyenlet, és a Rayleigh-hossz: 12. egyenlet képletét.

A szakirodalomban található még egy képlet szállézer fókuszált nyalábjának, fókuszfoltátmérőjének megadására, melyben f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusztávolsága, d_{fc} a nyalábtovábbító optikai szál magátmérője f_{coll} a nyalábot párhuzamosító kollimátor fókusztávolsága: ezt összegzi a 15. egyenlet [35], [42], [43]. Ezt a képletet mindhárom hivatkozott irodalom közelítő képletnek nevezi, ezért az ennek alapján kiszámolt értékeket két értékes jegyre adom meg.

$d_{f0} = \frac{d_{fc} f}{f_{coll}}$	15. egyenlet
--------------------------------------	--------------

Az eddig tárgyalt optikai elemeket és a lézer sugármenetét az 4. ábra mutatja. A 10. egyenlet elemezve, ha a fókuszálólencse fókusztávolságát csökkentjük, akkor elvben a foltméret lineárisan csökken, és a 12. egyenletből következik, hogy a Rayleigh-hossz négyzetesen csökken. Az 10. egyenlet elemezve, ha a lézernyalábot x -szeresére tágitjuk, akkor elvben a foltméret $1/x$ függvény szerint csökken, és a 12. egyenletből következik, hogy Rayleigh-hossz $1/x^2$ függvény szerint csökken. Azért elvileg, mert rövidebb fókuszu fókuszálólencsét

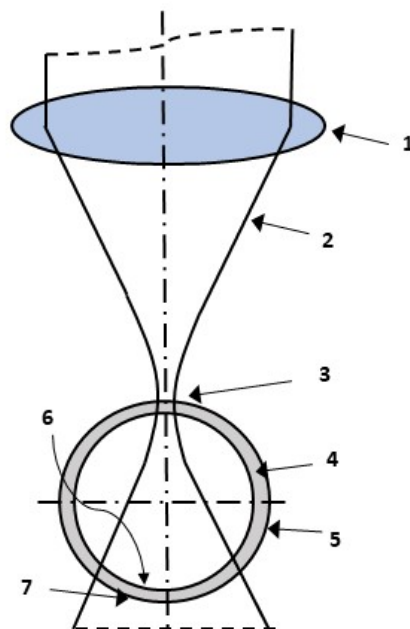
használva nő a szférikus aberráció, romlik a nyalábterjedési tényező, tehát d_{f0} és Z_R nem annyira erősen csökken [31].



4. ábra
A fókuszált lézernyaláb jellemzői

1 – nyalábtovábbító optikai szál belső magja, 2 – kollimátor lencse, 3 – fókuszálólencse,
4 – divergenciaszög, 5 – fókuszmélység, 6 – nyalábtengely d_{fc} – nyalábtovábbító optikai szál
belső magjának átmérője, d_b – párhuzamosított nyaláb átmérője, f_{coll} – kollimátor lencse
fókusz távolsága f – fókuszálólencse fókusz távolsága, Z_R – Rayleigh-hossz, d_{f0} –
fókuszfoltátmérő (nyalábnyakátmérő)

Hol van ezeknek a tényezőknek szerepe? Minél 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 vágásról van szó, melynek egyik alkalmazása az értágító sztentek vágása, akkor úgyis kicsi a falvastagság ($\sim 0,100$ mm), tehát használhatunk kis foltméretet, és ebben az esetben a kis Rayleigh-hossznak az lesz az előnye, hogy a megmunkálással ellentétes oldali belső csőfalon defókuszbba kerül a nyaláb, tehát szétterül, s így nem lesz vagy kevésbé lesz hő okozta átalakulás a cső szemközti belső falában (5. ábra).



5. ábra

A fókuszált nyaláb hosszmetzeti vázlata cső vágásakor

1 – fókuszálólencse, 2 – a fókuszált nyaláb hosszmetzete, 3 – vágási oldal, 4 – a cső keresztmetzete, 5 – külső fal, 6 – belső fal, 7 – átellenes oldal

Itt mutatom be az értekezésben kiszámolt és mért mennyiségek mértékegységének és pontosságának ésszerű használatát: Az egyik támpont a szakirodalomban használt és ésszerű mértékegységek használata, mely a 19. táblázat. Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezéseiben d_0 megszokott mértékegysége μm , az egyenlet másik oldalán szereplő λ -t is μm -ben érdemes behelyettesíteni, míg f mm-ben szokott adni, így d_b -t is abban helyettesítjük majd be. A másik dolog, amit

figyelembe kell venni az, hogy a 15. egyenlet közelítés, tehát az ebből számolt adatokat, a fókusz távolságot is elég két értékes jegyre megadni.

A másik nehézség az, hogy jelen fejezetben sok jellemző táj határok között változik, ami maga után vonja a belőle számított jellemzők széles határok közötti változását: a fejezet elején ms impulzusidejű lézerberendezésekről beszélek, majd ns-os és fs-os impulzusidejűekről, az utóbbiaknál nagy az impulzusfrekvencia, ezért e lézerek bizonyos jellemzőit normálalakban tudom jól megadni.

A fenti szempontok szerint készült a 1. táblázat, mely a jelen fejezetben bemutatott számolt és mért mennyiségek pontosságát adja meg, ezt vesszük alapul a továbbiakban.

Jel	Mértékegység	Kiszámolt vagy mért pontosság
f	mm	tized mm-re kerekítve
d _{fc}	μm	μm-re kerekítve
d _b	mm	tized mm-re kerekítve
P _{av}	W	tized W-ra kerekítve
E _{v1}	J/mm ³	J/mm ³ -re kerekítve, vagy normál alak
E _{v2}	J/mm ³	J/mm ³ -re kerekítve, vagy normál alak
E _i	mJ	század mJ-ra kerekítve
D _{BT}	μm	század μm-re kerekítve, vagy normál alak
f _i	kHz; Hz	Hz-re kerekítve
P _i	W	W-ra kerekítve, vagy normál alak
Z _R	μm	μm-re kerekítve
PO	%	századszázalékra kerekítve
k ₁	μm	μm-re kerekítve
k ₂	μm	μm-re kerekítve

1. táblázat Az értekezésben kiszámolt vagy mért mennyiségek pontossága

Chen [44] cikkében először a párhuzamos lézernyaláb átmérőjét lehet kiszámítani a 9. egyenlet rendezése alapján, mely a 18. egyenletet adja. A párhuzamos lézernyaláb átmérőjére a 2. táblázat első oszlop adatainak behelyettesítése után 3,8 mm-re adódik, így már minden adat rendelkezésre áll a Rayleigh-hossz kiszámításához, ami a 12 egyenlet alapján 96 mikrométerre adódik.

Demir [45] cikkében a 2. táblázat 2. oszlop adatainak behelyettesítésével minden adat rendelkezésre áll a fókuszálólencse fókusz távolságának kiszámításához, melyhez a 10. egyenlet átrendezésével kapjuk az 16. egyenletet, melyből 60 mm jön ki.

$f = \frac{d_{f0} d_b \pi}{4 \lambda M^2}$	16. egyenlet
--	--------------

Ezek után minden adat rendelkezésre áll a Rayleigh-hossz kiszámításához, melyre a 12. egyenlet alapján 230 μm adódik.

García-López [46] cikkéből a nyalábvezető szál átmérője a 2. táblázat 3. oszlop adatait felhasználva a 15. egyenletből d_{fc} -t kifejezve a 17. egyenletből kiszámolható, ez 50 μm -re adódik, ez után az 18. egyenletből a párhuzamos nyaláb átmérője 9,2 mm-re adódik ki, majd a Rayleigh-hossz a melyre a 12. egyenlet 113 μm -t ad.

$d_{fc} = \frac{d_{f0} f_{coll}}{f}$	17. egyenlet
--------------------------------------	--------------

$d_b = \frac{4\lambda M^2 f}{d_{f0} \pi}$	18. egyenlet
---	--------------

Végül Catalano [30] cikkéből a 2. táblázat 4. oszlop adatait behelyettesítve a párhuzamos lézernyaláb átmérőjét lehet kiszámítani, mely 6,0 mm-re adódik. Ezután a szokott módon kiszámíthatjuk a Rayleigh-hosszat, mely 230 μm lesz. Catalano által használt IPG YLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer annyiban tér el az előző cikkekben használttól, hogy akár 100 ns-os impulzusok kibocsátására is képes.

Publikáció	Chen et al 2012 [44]	Demir et al. 2013 [45]	García- López et al 2016 [46]	Catalano et al. 2017 [30]
d_{f0} (μm)	12	23	20,8	23
d_{fc} (μm)	n.a.	n.a.	50	n.a.
f (mm)	30	60	50	60
f_{coll} (mm)	n.a.	n.a.	120	n.a.
hullámhossz (μm)	1,07	1,064	1,07	1,064
M^2 nyalábminőség tényező	1,1	1,7	2,82	1,7
d_b (mm)	3,8	5,9	9,2	6,0
Z_R (μm)	96	230	113	230

2. táblázat A sztentgyártó szállézerekben előállított lézernyalábok jellemzői

<i>Cikk</i>	<i>Chen et al 2012 [44]</i>	<i>Demir et al. 2013 [45]</i>	<i>García-López et al 2016 [46]</i>	<i>Catalano et al. 2017 [30]</i>
<i>Lézerberendezés gyártó, típus</i>	<i>n.a.</i>	<i>MedPro fiber laser workstation from PRECO Company</i>	<i>MedPro fiber laser workstation from PRECO Company</i>	<i>IPGYLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer</i>
<i>Megmunkált anyag</i>	<i>316LVM</i>	<i>AZ31 magnéziumötvözet</i>	<i>AISI 316L rozsdamentes acél</i>	<i>AISI 316L rozsdamentes acél</i>
<i>Csővastagság (μm)</i>	<i>80</i>	<i>200</i>	<i>220</i>	<i>200</i>
<i>Csőátmérő (mm)</i>	<i>3,0</i>	<i>2,5</i>	<i>3,0</i>	<i>n.a.</i>

3. táblázat A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

A megadott és kiszámolt adatokat a 2. táblázat tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket kövér és dőlt betűvel szedve tüntettük fel. Az eddig elemzett kísérleteknél használt lézerberendezések, valamint a felhasznált anyagok jellemzőit és geometriai adatait a 3. táblázat tartalmazza.

Az összes elemzett cikknél a megmunkált anyag vastagsága a fókuszmélységen belül volt, tehát a kétszeres Rayleigh-hosszon belül helyezkedett el, ezért nem kell számolni a nyalábminőség tényezőnek a lézerrendszeren belüli, főleg a zoomos nyalábtágító lencsehibái miatti romlásával, amit egy korábbi cikkemben elemeztem [31].

Ha most a jelen fejezetben vizsgált sztentvágó lézerek és a korábbi cikkemben vizsgált mikromegmunkáló szállézernek néhány fontos adatának tartományát összehasonlítjuk (4. táblázat), akkor az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A sztentvágó lézerek fókuszfoltátmérőjének átlaga kisebb, ez nagyobb energiakoncentrációt, és nagyobb vágási sebességet tesz lehetővé.
- a sztentvágó lézerek fókuszáló lencséje fókusztávolságának átlaga kisebb, ez kisebb fókuszfoltátmérőt okoz: ld. 10. egyenlet.
- a sztentvágó lézerek kollimátor lencséje fókusztávolságának átlaga nagyobb, ez kisebb fókuszfoltátmérőt okoz: ld. 15. egyenlet.

- a sztentvágó lézerek Rayleigh-hosszának átlaga kisebb, ez még lehetővé teszi a csőfal átvágását, de segít abban, hogy a cső átellenes belső falán a fókuszált lézernyaláb defókuszba kerüljön (5. ábra).

Az mikromegmunkáló lézerek összehasonlításából Guerra [47] cikkét kihagytam, mivel itt a fókuszfoltátmérő 150 mikrométer és a Rayleigh-hossz 14867 mikrométer kiugróan nagy érték a többi lézeréhez képest.

	Ebben az értekezésben vizsgált sztentvágó lézerekénél	Általános mikromegmunkáló szállézerekénél [48]
d_{f0} (μm)	12–23	9,4–73
f (mm)	30–80	50–190
f_{coll} (mm)	50–120	28,4–50
Z_R (μm)	96–367	131–3154

4. táblázat A sztent vágó és az általános mikromegmunkáló lézerek adatainak összehasonlítása

Ebben a fejezetben bemutattam a sztentgyártó szállézerek tudományos publikációkban hiányzó adatainak meghatározási módszerét, ami a szakirodalomban különböző helyeken megtalálható képletek együttes alkalmazásával történik.

3.2 Sztentek és azok lézeres vágása

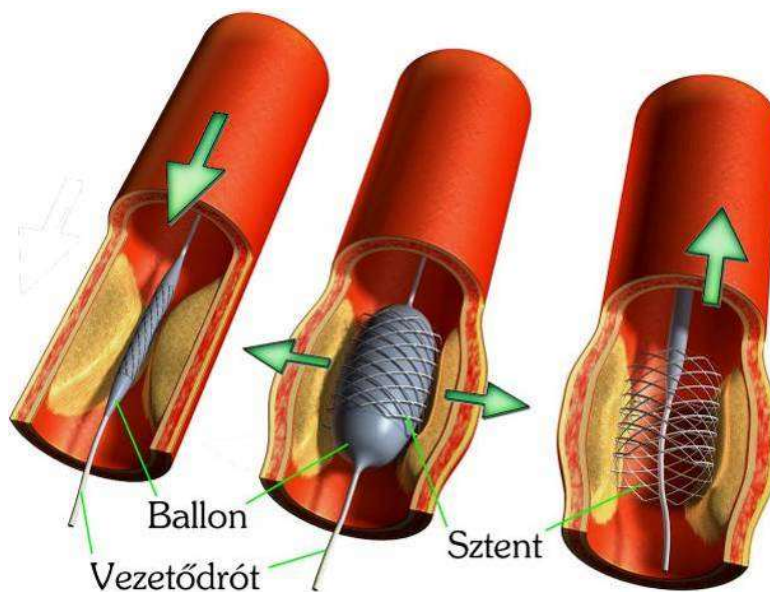
3.2.1 A sztentek

A sztent vagy a vaszkuláris sztent éren keresztül bevezetett ballonos tágítású vagy öntáguló implantátum, melynek célja, hogy fenntartsa vagy helyreállítsa az ér vérszállító funkcióját. [49]

A szív koszorúereinek szűkülete Magyarországon a leggyakoribb népbetegség. Az érszűkület azt jelenti, hogy az érfal belső részén lerakódások, ún. plakkok jönnek létre; ez az ateroszklerózis. A lerakódások idővel elhálnak, elmeszesednek, csökkentve ezzel az erek átmérőjét és rugalmasságát. Mindezek a folyamatok idővel a helyi keringés elégtelenségét okozzák. Az érszűkületek a szívi, az agyi, ill. a perifériás ereken egyaránt jelentkezhetnek. Ha az érszűkület a szív oxigénellátását biztosító koszorúerek valamelyikében jelentkezik, az rövid idő alatt a szívizomzat egy részének leállását és elhalását okozhatja; ezt a jelenséget nevezik szívinfarktusnak. A koszorúerek szűkületei EKG-val is kimutathatók, mivel változik a szív egyes területeinek villamos aktivitása, de az érelzáródások rendszeren csak katéteres érfestéssel (angiográfia) vagy kardiocétével diagnosztizálhatók.[49]

Az elzáródott koszorúerek gyógyításának klasszikus módszere a gyógyszeres kezelés vagy az elzáródott érnek az áthidalása (by-pass), nagy kockázatú szívműtéttel. Az 1980-as években alternatív módszereket dolgoztak ki, amelyek célja a keringés helyreállítása olyan rekanalizációs módszerekkel, amelyek egészen apró (minimálinvázív) beavatkozások a szívműtétekhez képest. E módszerek különleges szerkezeti megoldásainak és az ehhez illeszkedő különleges bioanyagoknak köszönhetően terjedhettek el, ezért létrehozatalukban fontos szerepet játszottak az anyagtechnológiai kutatások. [49]

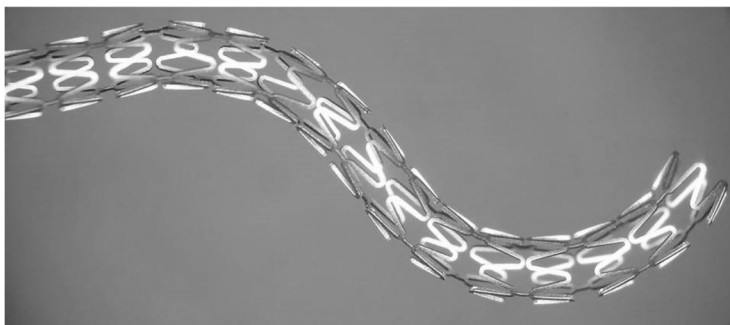
Az 1990-es évek közepétől a legfontosabb értágítási módszerre vált a sztent beültetése. Ballonos előtágítás után a ballonkatéterre szerelt, csőszerű fémhálót betolják az érszűkületbe, majd a sztentet a hordozó ballon felfújásával feltágítják (6. ábra). A sztent bent marad az érben, és nem engedi visszazáródni az érfalat. A sztent beültetésének eredménye tehát az, hogy megnyílik az út a vér áramlása számára. Az érprotézis tartósan megtámasztja az érfalat. Az értágítóbetétek az 1980-as évek végén jelentek meg, de tíz év alatt az érszűkületek – szívkoszorúerek, perifériás erek és a nyaki főverőér, a carotis – gyógyításának fő eszközeivé váltak. [49]



6. ábra
Sztentes értágítás [49]

A koszorúér tágító sztentek fejlesztése 1993-ban indult el Magyarországon: az első hazai szabadalmi bejelentés 1996-ban történt [L. Major, “Endoluminális tágítóbétét enlarging facing for blood-vessels. Hungarian Patent, P9602099, 1996.”] [50] , megelőzve az első külföldi gyártó szabadalmi bejelentését is [Medstent: Tágítható érfaltámasztó gyűrű EXPANDIBLE STENT. Hungarian Patent, P9900429, 1996] [51]. A lézeres gyártás 2005-ben indult a BME

ATT által vezetett K+F konzorcium keretében. Az 7. ábra az itt készült lézerrel vágott maratás nélküli sztentet mutatja. Az ennek bázisát képező LASAG KLS-246 Nd:YAG lézeren alapuló Corina vágórendszert az 8. ábra mutatja.



7. ábra

Koszoriér tágító sztent (Minvasive Kft. Budapest, Magyarország)

Az alapanyaguk fajtáját tekintve manapság kétféle sztentet gyártanak: mindig fém az alapanyaga azoknak a sztenteknek, amelyek örökre bent maradnak a testben és egyes felszívódó sztenteknek is. A felszívódó sztentek körében a fém mellett jelentős szerep jut a biopolimer anyagú sztenteknek.

Most a csak fémből lézeres vágással gyártott sztenteket vizsgáljuk. Ezek előnyei a jó mechanikai tulajdonságok, tartósság, könnyű gyárthatóság, biokompatibilitás, korrózió ellenállás. Hátrányaik, hogy nem lebomlóak. Alkalmazásuk korlátja, hogy újra elzáródhat az ér a sztent helyén. Fejlesztési lehetőségek: új ötvözetek, alakemlékező fémek, polimerek alkalmazása, gyógyszerkibocsátó sztentek fejlesztése. [52]

A sztentek gyártása történhet huzalból hegesztéssel, csőből lézeres vágással és additív gyártással. A lézeres vágással végzett gyártás előnye a gyorsaság és a pontosság, hátrányai a hő okozta károsodások: oxigén segédgáz esetén az oxidréteg, az újraömlött réteg, melyeket utómegmunkálással el kell távolítani, és a hőhatásövezet. További hátrányok az éles sarkok, és a nagy beruházási és működtetési költségek. [52]

A sztentek gyártásának vizsgálata után áttérek a lézeres fúrással foglalkozó értekezés részre. Ennek indoka, hogy a vágás is fúrással kezdődik. Például, ha egy lemezen vagy egy fólián egy zárt alakzatot akarunk kivágni, akkor a vágási lézerbeállítás csomag nem biztos, hogy elegendő a vágás elkezdéséhez, ekkor egy furatot szoktak először létrehozni, innen indul a vágás.

3.3 A lézeres fúrás szakirodalma

A lézeres fúrás szakirodalmában Buza megkülönböztet egyimpulzusos fúrást, illetve ütve fúrást, ahol a lézer egy furat kialakításához több impulzust használ, a nagyobb furatok létrehozásához használt trepanációs (lékeléses, körkivágásos) fúrást és a bolygófúrást [7]. Ebben az értekezésben az egyimpulzusos fúrást vizsgálom, amely eljárással fémbe munkált furatokkal létre lehet hozni szűrőket, maszkokat [5], üvegszálak csatlakozóit [6].

4 A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE

4.1 A kísérletekhez használt Corina lézerrendszer ismertetése

Az Nd:YAG lézer működését és felépítését Buza Gábor könyve tartalmazza [7]

Most vizsgáljuk meg a Corina lézerrendszer felépítését (8. ábra), melyet sztentgyártásra fejlesztett ki a Minvasive Kft. A rendszer alapja a LASAG KLS-246 típusú Nd:YAG impulzusüzemű lézer. A rezonátor hűtését víz keringtetés biztosítja. A lézer egy sztereomikroszkópot is magába foglal lézersugárzás szűrőkkel, ami a megmunkálás megfigyelését teszi lehetővé. A munkadarab pozicionálását Aerotech mozgatórendszerrel oldották meg, mely a vízszintes síkban X-Y tengelyek mentén történő mozgást, és egy vízszintes tengely körüli forgatást tesz lehetővé. A minimális súrlódás és nagy beállási pontosság érdekében ez a rendszer légcsapágyazást használ, így ennek táplálásához egy kompresszorra is szükség van. A Minvasive Kft. a lézer és a mozgatórendszer összehangolt működtetésére saját szoftvert fejlesztett Cut-control néven.



8. ábra

A Corina vágórendszer

4.2 A kísérletekhez használt szállézerrendszer ismertetése

Az szállézer működését és felépítését Buza Gábor könyve tartalmazza [7].

Anyagmegmunkáló szállézereknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást, ahol lézardiódák adják át az energiájukat a nyitó és zárótükör funkcióját ellátó Bragg-rácossal

felszerelt, gerjesztett optikai szálnak. Innen a nyalábtovábbító optikai szállal viszik el a sugárzást a fókuszálófejhez. Jelen értekezésben a mikromegmunkálás terén alkalmazott szállézereket elemezzük.

A fókuszálófejben kilép a lézersugárzás a nyalábtovábbító 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 fűrés, vágás, hegesztés stb. A felhasznált mennyiségeket, jelöléseket és mértékegységeket a 19. 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.

A kísérletekhez használt lézerrendszer alapja az IPG-gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú szállézer volt, melyet a Pulzor Művek épített ki munkadarab-mozgatóval és saját fejlesztésű vezérlőprogrammal.

A LASAG- és az IPG-gyártmányú lézerek adatainak részletes összehasonlítását a 5. táblázat tartalmazza.

Összehasonlítás	LASAG KLS 246 040 FC Nd:YAG lézer	IPG 150/1500-QCW- AC szállézer	Mértékegység
Hullámhossz	1064	1070	nm
Átlagteljesítmény	15	150	W
Legkisebb elérhető párhuzamos nyalábátmérő	2,5		mm
Nyalábminőség tényező	3...5	1,05	
Impulzusenergia minimuma	2		mJ
Impulzusenergia maximuma	180	1500	mJ
Impulzusidő minimuma	12	200	μs
Impulzusidő maximuma	300	50000	μs
Impulzusfrekvencia minimuma	0,1	10000	Hz
Impulzusfrekvencia maximuma	5000	50000	Hz
Maximális impulzusteljesítmény	0,6	1,5	kW

5. táblázat
A két lézer paramétereinek összehasonlítása

4.3 A felhasznált anyagok jellemzése

A rozsdamentes acélok különleges helyet foglalnak el a szerkezeti anyagok között: ezek a legnagyobb tömegben felhasznált, a korrózióval jól ellenálló anyagok.[49]

A rozsdamentes acéloknál a korrózióállóság, pontosabban a nedveskorrózióval (elektrokémiai korrózióval) szembeni ellenállás, a legalább 10,5% krómnak köszönhető, amely 1–5 nm vastagságú, passzív védőréteget alakít ki az acél felületén, és ez megvédi a további korróziótól, ill. lassítja azt. Molibdén hozzáadása még ellenállóbbá teszi ezt a passzív védőréteget, és fokozza annak regenerálódását a sérülése esetén; mindez erőteljesen növeli a korrózióállóságot. A szén viszont rontja a korrózióállóságot! [49]

A rozsdamentes acélok körében bioanyagként is a legismertebbek az ausztenites acélok. Alaptípusuk a 0,1% C-, 18,5% Cr, 8,5% Ni-tartalmú 1.4319-es (AISI 302) bioanyagként való alkalmazása széles körű. Orvosi tűk, injekciós tűk, vérvételi lándzsák, katéterek, vezetődrótok, rugók anyagaként elterjedten használják az olcsósága mellett azért is, mert a szilárdsága - a nagyobb széntartalomnak köszönhetően - meghaladja az 1.4301 (AISI 304) és az 1.4306 (304L) típusokét. Az ausztenites acélok bio-összeférhetősége sokat javult a kis C-tartalmú és a vákuumos átolvasztás révén kis szennyezőtartalmú acéloknak köszönhetően. A C-tartalom 0,02%, a foszfor 0,02%, a kéntartalom 0,01% alá csökkentése általánosan megfigyelhető. Az elterjedtebb amerikai szabványos jelölésükkel 304L, 304LV típusú acélokat az olcsóbb fogászati alkalmazásokban már kivethető protézisek anyagaként is alkalmazzák, nem csak orvosi eszközök gyártására. [49]

Az orvosi gyakorlatban az ausztenites acélok az implantátumok anyagaiként a Mo-ötvöztetésű 1.4571-es típussal kezdődnek, amelynek elterjedt amerikai szabványos jele: AISI 316Ti. A bioanyagként felhasznált típusokat vákuumos átolvasztással kezelik, és ez az acél jelölésében is megjelenik: 316LVM (1.4441) Az L betű az extra kis C-tartalomra utal, a VM rövidítés azt jelenti, hogy az acélt vákuumos átolvasztással tisztították; emiatt nagyon kicsi a kedvezőtlen hatású szennyezők (As, Bi, P, S, Sb, Se, Sn) mennyisége. Ez az acél 2,5% Mo-t is tartalmaz, és ennek köszönhetően jelentősen nagyobb a lyukkorrózióval szembeni ellenállása a Mo-mentes típusokhoz képest. A homogén ausztenites szerkezetet a nikkel mennyiségének 13-14%-ra növelése biztosítja. A fokozott korrózióállóságból adódó jobb biokompatibilitás teszi a 316LVM acélt a hagyományos implantátumanyagok vezetőjévé. [49]

Az ausztenit LKK-kristályrácsa magyarázza a viszonylag csekély szilárdságot és a nagy szívósságot. A hidegalakítás következtében (pl. hengerlés, mélyhúzás, hajlítás stb.) azonban

rendkívül erősen keményednek aminek az oka az, hogy az alakítás hatására az ausztenit egyre nagyobb része alakul át martenzitté. Az ausztenites acéloknál tehát nemcsak az alakítási keményedés működik, hanem az alakváltozás indukálta fázisátalakulás is. [49]

A definíció igényével: a bioanyag az orvosi eszközökben használt olyan élettelen anyag, amely ki van téve a biológiai rendszerrel való kölcsönhatásnak. Elméletileg minden anyagot bioanyagnak tekinthetünk, amelynek valamilyen orvosi alkalmazásban szerep jut. Az élő szervezettel való kölcsönhatások minősítésére vezettek be egy, a bioanyagok vonatkozásában alapvető fontosságú fogalmat: ez a biokompatibilitás. [49]

Magyarországon az MSZ EN ISO 25539-es szabványsorozat [53] és az MSZ EN ISO 7198:2017 [54] foglalja össze az endovaszkuláris (érbe helyezett) eszközök - protézisek, értágítók, szűrők, graftok - előírásait. [49]

A kristályközi korrózió elkerülésére a legjobb megoldásnak a C-tartalom csökkentése bizonyult. 1970-től, a kohászati technológia fejlődésével világszerte elterjedt az 1954-ben kidolgozott AOD-eljárás, s így az extra kis széntartalom biztosítása általánossá vált. Az ausztenites acélok bio-összeférhetősége sokat javult a kis C-tartalmú és a vákuumos átolvasztás révén kis szennyezőtartalmú acéloknak köszönhetően. Az ausztenites acél implantátumoknál fontos szerepet játszik a szemcseméret, amelynek csökkenése növeli a szilárdságot is és a kifáradással szembeni ellenállást. A szemcseméretre lényeges hatást gyakorol a gyártási folyamat: a kristályosodás, a hidegalakítás, a lágyítás, az újrakristályosodás. [49]

Egy másik precíziós gyártási eljárás, a lézeres vágás nagy jelentőséget kapott az értágítóbetétek - közismert idegen nevükön: sztentek - gyártásában. Az alig 0,1 mm falvastagságú csövek vághatóságát és a belőlük készült értágítóbetétek mechanikai viselkedését egyaránt erősen befolyásolja a szemcseméret. [49]

A sztentek anyagául szolgáló, jellemzően 1,200 mm átmérőjű és 0,090-0,120 mm falvastagságú csövekre a gyártók 3,5-5,0% átmérő- és vastagságtűrést, illetve 7-10% központossági tűrést garantálnak. Érdekes fejlesztési cél a gyógyszerartároló és gyógyszerkibocsátó képesség biztosítása porózus fémfelületekkel. Az utóbbi években több szabadalom is született a nagy sebességű nyomásos öntéssel vagy a félszilárd fázisú öntéssel előállítandó, a gyógyszerkibocsátó sztentek alapanyagául szolgáló porózus csövek gyártására vonatkozóan. [49]

Az 'MP35N' és főleg az 'L605' típusú Co-Cr ötvözetek 2000 után nagyon elterjedtek a sztentek anyagaként, ugyanis a nagy szilárdságnak köszönhetően jobban csökkenthető a sztent bordáinak vastagsága (kb. 60 mikrométerre) és a fémmel fedett felület, mint a 316LVM acélnál. [49]

A fóliafűrési kísérletekhez 50 mikrométer vastag vörösréz fóliát, is használtam a 20 mikrométer vastag rozsdamentes acél fólia mellett.

A 2019-ben a BME ATT-n végzett EDAX anyagösszetétel vizsgálat alapján a réz fólia 100% vörösréz tartalmú volt. Ugyanott ugyanakkor megvizsgáltuk az ezüst fóliát, melyre a 6. táblázatban látható összetételt kaptuk. A rozsdamentes acél fólia 1.4301 típusú ausztenites korrózióálló acélból készült.

Elem	Tömeg	Atom %	Net Int.
O K	6.22	29.26	13.04
ClK	0.29	0.61	4.37
AgL	83.42	58.2	603.25
CuK	10.07	11.93	43.9

6. táblázat Ezüst fólia összetétele

4.4 A kísérletek kiértékeléséhez használt mikroszkópok és képelemző programok

A BME Anyagtudományi Tanszéken használt mikroszkópok:

- Nikon SMZ-2 típusú, digitális kamerával felszerelt szteremmikroszkóp,
- Olympus PMG-3, digitális kamerával felszerelt fémmikroszkóp, Olympus DP 70 típusú digitális kamerával,
- Philips XL 30 típusú pásztázó elektronmikroszkóp.

Az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Kar Anyagismeret Laboratóriumában használt mikroszkópok:

- Zeiss egyenes állású anyagvizsgáló mikroszkóp Scope Photo képelemző programmal,

- Dyno Lite Edge USB mikroszkóp Dyno Capture képelemző programmal.

A KÍSÉRLETEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.5 Sztentgyártási csövek vágási kísérletei a szakirodalmi elemzéssel

4.5.1 A szakirodalomban található Nd:YAG lézeres sztentvágás adatainak elemzése

Most a szakirodalomban található, a kiegészítő számításokhoz elegendő adatot tartalmazó Nd:YAG lézeres sztentvágást tartalmazó publikációk adatainak elemzése következik. Itt az 1.-től a 16.-ig ismertetett egyenlet alapján tudtam hiányzó adatokat kiszámolni, így a kísérletek megismételhetőek lesznek. A kiszámolt új adatokat a 6. táblázatban dőlt és kövér karakterrel szerepeltetjük.

	Mérték- egység	<i>Kathuria 1 2005 [55]</i>	<i>Kathuria 2 2005 [55]</i>	<i>Nagy-1, 2013 [56]</i>	<i>Nagy-2, 2013 [56]</i>
<i>Anyag</i>		<i>316 L</i>	<i>316 L</i>	<i>Nitinol</i>	<i>Nitinol</i>
<i>Falvastagság</i>	μm	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>Átlagteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>6,5</i>	<i>2,4</i>	<i>9,6</i>	<i>9,0</i>
<i>Impulzusidő</i>	<i>ms</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>	<i>0,015</i>	<i>0,02</i>
<i>Impulzusenergia</i>	<i>mJ</i>	<i>6,5</i>	<i>80</i>	<i>2,4</i>	<i>3</i>
<i>Impulzusteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>130</i>	<i>800</i>	<i>160</i>	<i>150</i>
<i>Impulzus frekvencia</i>	<i>Hz</i>	<i>1000</i>	<i>30</i>	<i>4000</i>	<i>3000</i>
<i>Vágási sebesség</i>	<i>mm/s</i>	<i>1,17</i>	<i>0,17</i>	<i>10</i>	<i>10</i>
<i>Impulzusok közti távolság az anyagon</i>	μm	<i>1,17</i>	<i>5,67</i>	<i>2,50</i>	<i>3,33</i>
<i>Fókuszfoltátmérő</i>	μm	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>24,00</i>	<i>24,00</i>
<i>Vágásifolt-átfedés</i>	<i>%</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>89,58</i>	<i>86,11</i>
<i>Egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján</i>	<i>J/mm³</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>400</i>	<i>375</i>
<i>Rayleigh-hossz</i>	μm	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>60</i>	<i>60</i>

6. táblázat Nd:YAG lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel vannak szedve

Hiányzó adatok kiszámolása Kathuria 2005 [55] cikkében a második beállításnál a 3. egyenlet [27] lapján ha elosztjuk a 80 mJ-os impulzusenergiát a 0,1 ms-os impulzusidővel, akkor 800 W impulzusteljesítményt kapunk. Ez után a 2. egyenlet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet

elosztjuk a frekvenciával, akkor 5,67 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra. ami a 6. táblázat 4. oszlopában szerepel, itt a falvastagság 100 mikrométer. Viszont Kathuria 2005 [55] cikkében az első beállításnál kevesebb, mint tizedrésze az impulzusenergia, az impulzusidő viszont a fele, így csak 130 wattot kapunk az impulzusteljesítményre, az impulzusok közti távolság 1,17 mikrométer lesz tekintettel a nagy 1 kHz-es impulzusfrekvenciára. A kiszámolt értékek a 6. táblázatban vastagon szedve vannak. Ezekben a cikkekben nincs megadva sem a fókuszfolt átmérője, sem vágási rés szélesség, így nem tudok egységnyi térfogatra jutó energiát számolni. Ezekben a cikkekben a lézerrel vágott sztent 316L anyagból készült.

A 6. táblázat utolsó 2 oszlopában lévő megmunkálások a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén használt Nd:YAG lézerrel készültek, ezt a lézert 8-as nyalábtágító beállításnál használták, a sztentek vágásánál kis fókuszfoltátmérő és kis Rayleigh-hossz elérésére. Így ezeknél a megmunkálásoknál kiszámítható az egységnyi térfogatra jutó energia a lézerfolt átmérő alapján, a 7. egyenletbe behelyettesítve a Nagy-1 által jelölt oszlop adatait kapjuk a 19. egyenlet, a hosszúságot mm-be, az energiát Jouleba átváltva a 20. egyenletet az eredmények a 6. táblázat utolsó előtti sorában láthatóak.

$E_{V1} = \frac{2,4 \text{ mJ} \cdot 1000 \mu\text{m}}{2,50 \mu\text{m} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 100 \mu\text{m} \frac{24 \mu\text{m}}{1000}} = 400 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	19. egyenlet
---	--------------

$E_{V1} = \frac{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot 1 \text{ mm}}{2,50 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 0,1 \text{ mm} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ mm}} = 400 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	20. egyenlet
---	--------------

A 6. egyenletből kiszámítható a vágásifolt-átfedés az utolsó 2 megmunkálásnál, mely 85% felett van. Ennek az a magyarázata, hogy 3 mJ és ez alatti impulzusenergiával dolgoztak, és ha 1 impulzus nem tudja átfújni az anyagot, akkor nagyobb átfedés kell, a korábbi elemzésem alapján.

Nagy 2013-as [56] cikkében nézzük először az 1. beállítást: az átlagteljesítmény az 1. egyenlet [26]. egyenletből 9,6 W-ra adódik, ha elosztjuk a 2,4 mJ-os impulzusenergiát a 0,015 ms-os impulzusidővel, akkor 160 W impulzusteljesítményt kapunk. Ez után a 2. egyenletet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor 2,5 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra.

Nagy 2013-as [56] cikkében most nézzük a 2. beállítást: az átlagteljesítmény az 1. egyenletből 9 W-ra adódik, az 1. egyenlet alapján ha elosztjuk a 3 mJ-os impulzusenergiát a 0,02 ms-os impulzusidővel, akkor 150 W impulzusteljesítményt kapunk. Ez után a 2. egyenlet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor 3,3 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra.

Ha most a táblázatot soronként elemzem, akkor kiderül, hogy a nitinol vágásához nagyobb átlagteljesítmény kell, melyet a 6. egyenlet alapján az impulzusfrekvencia 4 kHz-re illetve 3 kHz-re emelésével értek el.

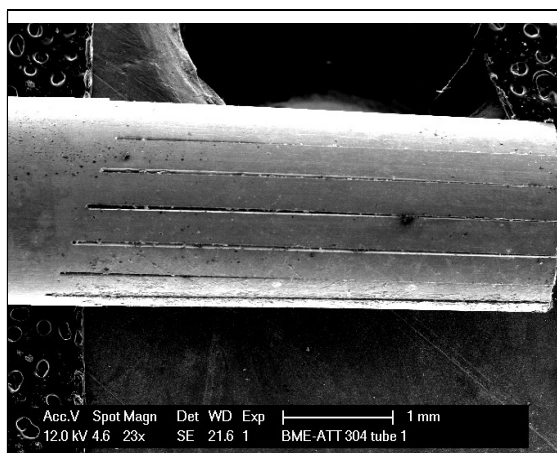
4.5.2 Saját Nd:YAG lézeres sztentvágás adatainak elemzése

Most a korábbi kísérletemben [31] szereplő adatokat elemezzük tovább. Az 1. egyenlet alapján ha elosztjuk a 8 mJ-os impulzusenergiát a 0,02 ms-os impulzusidővel, akkor 400 W impulzusteljesítményt kapunk. A kísérletekben a lézerbeállítások azonosak voltak, csak a vágási sebességet változtattam, így a 7. táblázat impulzusok közti távolság sora a 2. egyenlet, a vágásifolt-átfedés a 6. egyenlet alapján számítható ki, a térfogati energiabavitelhez csak a fókuszfoltátmérő volt adva, így azt a 7. egyenletből számítottam, a Rayleigh-hosszra a következő publikációmban adtam becslést [31]. A 7. táblázat tartalmazza a kiszámolt új adatokat dőlt és kövér karakterrel szedve.

		Meszlényi-2008 [31]					
		1	2	3	4	5	6
<i>Falvastagság</i>	μm	<i>120</i>	<i>120</i>	<i>120</i>	<i>120</i>	<i>120</i>	<i>120</i>
<i>Átlagteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>12</i>
<i>Impulzusidő</i>	<i>ms</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>
<i>Impulzusenergia</i>	<i>mJ</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>
<i>Impulzusteljesítmény</i>	<i>W</i>	400	400	400	400	400	400
<i>Impulzus frekvencia</i>	<i>Hz</i>	<i>1500</i>	<i>1500</i>	<i>1500</i>	<i>1500</i>	<i>1500</i>	<i>1500</i>
<i>Vágási sebesség</i>	<i>mm/s</i>	<i>1,5</i>	<i>3</i>	<i>4,5</i>	<i>6</i>	<i>9</i>	<i>15</i>
<i>Impulzusok közti távolság az anyagon</i>	μm	1,00	2,00	3,00	4,00	6,00	10,00
<i>Vágásifolt-átfedés</i>	<i>%</i>	95,83	91,67	87,50	83,33	75,00	58,33
<i>Egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján</i>	<i>J/mm³</i>	2778	1389	926	694	463	278
<i>Rayleigh hossz</i>	μm	60	60	60	60	60	60

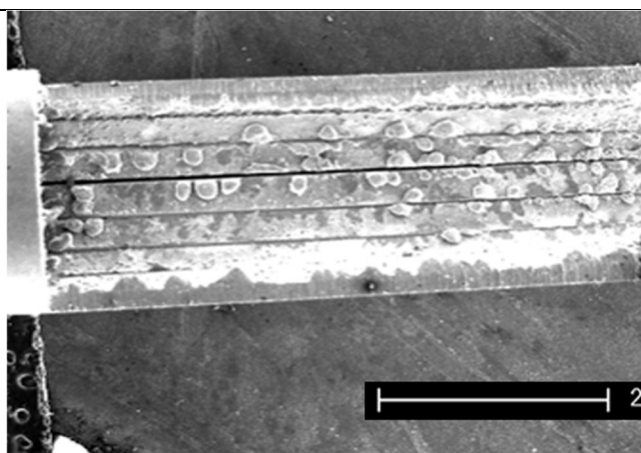
7. táblázat A saját vágási sebességet variáló kísérlet, az újonnan kiszámolt adatok dőlt és kövér karakterrel vannak szedve

Ha most a táblázat adatait elemezzük, akkor nyilvánvaló, hogy a 15 mm/s-os maximálisan elérhető vágási sebesség a technológiai optimum, itt a legkisebb a vágásifolt-átfedés és legnagyobb az impulzusok közti távolság, és a minimális egységnyi térfogatra jutó energia miatt itt képződik a legkevesebb tapadósalak, ilyen nagy vágási sebesség az elemzett szakirodalomban impulzus üzemű Nd:YAG lézeres sztent vágásoknál nem található. Az 9. ábra mutatja ezen kísérlet alatt vágott cső külső palástját, míg a belső oldalon a salakképződést a 10. ábra. Az anyag 304L rozsdamentes acél cső volt, a falvastagság 120 mikrométer.



9. ábra

1500 Hz-es lézerbeállítással készített vágások a cső külső palástján SEM kép. A vágási sebesség az ábra tetején lévő vágástól az alsó irányában nő 2,5–40 mm/s között.



10. ábra

1500 Hz-es lézerbeállítással készített vágások a cső belső palástján SEM kép. A vágási sebesség az ábra alján lévő vágástól a felső irányában nő 2,5–40 mm/s között

4.5.3 A szakirodalomban található szállézeres sztentvágás adatainak elemzése

	Mérték- egység	<i>Kleine ideal, 2002 [57]</i>	<i>Meng 2009 [58]</i>	<i>Muhammad jó 2010 [59]</i>	<i>Chen 2012 [44]</i>	<i>Chen 2013 [60]</i>	<i>Catalano 2017 [30]</i>
<i>Anyag</i>		<i>316L</i>	<i>316L</i>	<i>316L</i>	<i>316LVM</i>	<i>316LVM</i>	<i>316L</i>
<i>Falvastagság</i>	μm	<i>100</i>	<i>110</i>	<i>150</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>200</i>
<i>Átlagteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>1,5</i>	<i>7,0</i>	<i>20,0</i>	<i>5,8</i>	<i>5,8</i>	<i>11</i>
<i>Impulzusidő</i>	<i>ms</i>	<i>0,1</i>	<i>0,15</i>	<i>0,1</i>	<i>0,07</i>	<i>0,007</i>	<i>0,00025</i>
<i>Impulzusenergia</i>	<i>mJ</i>	<i>3,00</i>	<i>4,67</i>	<i>10,00</i>	<i>0,39</i>	<i>3,87</i>	<i>0,44</i>
<i>Impulzusteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>30</i>	<i>31</i>	<i>100</i>	<i>6</i>	<i>552</i>	<i>1760</i>
<i>Impulzus frekvencia</i>	<i>Hz</i>	<i>500</i>	<i>1500</i>	<i>2000</i>	<i>15000</i>	<i>1500</i>	<i>25000</i>
<i>Vágási sebesség</i>	<i>mm/s</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>16,7</i>	<i>20</i>	<i>12</i>	<i>2</i>
<i>Impulzusok közti távolság az anyagon</i>	μm	<i>8,00</i>	<i>5,33</i>	<i>8,33</i>	<i>1,33</i>	<i>8,00</i>	<i>0,08</i>
<i>Fókuszfoltátmérő</i>	μm	<i>16,00</i>	<i>12,00</i>	<i>25,00</i>	<i>12,00</i>	<i>12,00</i>	<i>23</i>
<i>Vágásifolt-átfedés</i>	<i>%</i>	<i>50,00</i>	<i>55,56</i>	<i>66,67</i>	<i>88,89</i>	<i>33,33</i>	<i>99,65</i>
<i>Vágási rés keresztmetszet szélesség felül</i>	μm	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>30</i>	<i>20</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>
<i>Egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján</i>	<i>J/mm³</i>	<i>234</i>	<i>663</i>	<i>320</i>	<i>302</i>	<i>403</i>	<i>1196</i>
<i>Egységnyi térfogatra jutó energia a vágási rés keresztmetszet szélesség alapján</i>	<i>J/mm³</i>	<i>197</i>	<i>398</i>	<i>267</i>	<i>181</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>
<i>Rayleigh hossz</i>	μm	<i>160</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>96</i>	<i>n.a.</i>	<i>230</i>

9. táblázat Szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel vannak szedve

Most elemezzük a szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 9. táblázatban adtam meg dőlt és kövér karakterrel szedve. A Rayleigh-hosszokat a 2. táblázatból vettem át, az ott leírtak alapján. Kleine, 2002 [57] cikkében szereplő adatokkal a kísérletéhez tartozó Rayleigh-hossz kiszámítható és 160 mikrométerre adódik.

Kleine 2002 [57] cikkében az ideális lézerbeállítást vettem alapul. Az átlagteljesítmény az 1. egyenlet [26] 1,5 W-ra adódik, a 3. egyenlet [27] alapján ha a 30 W-os impulzusteljesítményt megszorozzuk a 0,1 ms-os impulzusidővel, akkor 3,00 mJ impulzusenergiát kapunk.

Meng 2009 [58] cikkében a 1. egyenlet alapján ha a 7,0 W-os átlagteljesítményt elosztjuk az 1,5 kHz-es impulzusfrekvenciával, akkor 4,67 mJ-os impulzusteljesítményt kapunk, majd a 3. egyenlet [27] alapján, ha a 4,67 mJ-os impulzusenergiát elosztjuk a 0,15 ms-os impulzusidővel, akkor 31 W-os impulzusteljesítményt kapunk.

Muhammad 2010 [59] cikkében vizsgáljuk meg az ideális lézeres vágás beállítás adatait: a Kleine 2002-es cikkének elemzésénél leírt lépéseket követve az átlagteljesítményre 20 W, az impulzusenergiára 10,00 mJ értéket kapunk.

Ha most megismétljük a Meng 2009 [58] cikkének elemzésekor leírt számításokat, akkor Chen 2012 [44], Chen 2013 [60] és Catalano 2017 [30] cikkéből megkapjuk az impulzusenergiát és impulzusteljesítményt, melyek a 9. táblázatban szerepelnek.

Most elemezzük tovább soronként a szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 9. táblázatban adtam meg dőlt és kövér karakterrel szedve: a 2. egyenletet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor mikrométerben megkapjuk az impulzusok közti távolságot. A 6. egyenletből kiszámítható a vágásifolt-átfedés mind a hat megmunkálásnál, melyek a 9. táblázat 10. és 11. sorában szerepelnek.

Az egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján – mely minden cikkben adott – a 7. egyenletből számolható ki. Az egységnyi térfogatra jutó energia a vágási rés keresztmetszet szélesség alapján – mely csak az első négy cikkben adott a 8. egyenletből számolható ki, ezek a 9. táblázat 14. és 15. sorában szerepelnek.

Összehasonlítva a 6 elemzett publikáció közölt és kiszámolt adatait az alábbi következtetésekre jutok:

- A legkisebb átlagteljesítménnyel Kleine 2002 [57] tudott sztentet vágni.
- Catalano 2017 [30] a nagyon rövid impulzusidő miatt ablációval, tehát párologtatással vágott, itt nagy vágásifolt-átfedés kellett: 99,65%, és emiatt a legkisebb a vágási sebesség: 2 mm/s.
- Chen 2012 [44] tudott a leggyorsabban vágni 20 mm/s sebességgel, ez nagyobb, mint a saját kísérletemben elért 15 mm/s, ez a szállézer jobb nyalábminőségéből következő kis fókuszfolt méret miatt van, és a második legnagyobb 15 kHz-es ismétlési frekvencia miatt. Itt 89% körüli vágásifolt-átfedés elegendő volt a vágáshoz.

4.5.4 Az ultrarövid: ps-os és fs-os impulzust használó lézerekről szóló cikkek elemzése

Most elemezzük az ultrarövid lézerimpulzusokat használó sztentgyártó lézerek kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 10. táblázatban adtam meg dőlt és kövér karakterrel szedve, itt csak a Rayleigh-hosszokat sikerült kiszámolni 3 publikációból, de a többi adat elemzése is értékes lehet. A Muhammad 2012-es PhD értekezésében [27] használt Trumpf TruMicro 5350 lézernél a legkisebb a fókuszfoltátmérője, mely annak köszönhető, hogy a hullámhossza harmada a megszokott szál- vagy Nd:YAG lézerekének, az 5. egyenlet [26] következik, hogy a foltátmérő lineárisan csökken a hullámhossz csökkentésével. Az ultrarövid impulzusidőből az következik, hogy a megmunkálás ablációval megy végbe, vagyis egy kis réteget párologtat el a lézer a vágási vonalon, ezért a vágási vonalon többször át kell menni a lézerrel. Az impulzusidők 250 nanosecundumtól 100 fs-ig terjednek. A 11. táblázatban a megmunkálás adatait elemeztem, itt csak azokat a cikkeket tudtam analizálni, amiben volt adat az elemzéshez, így kissé mások a cikkek, mint a 10. táblázatban szereplők. A 11. táblázatból kiderül, hogy a 6 ps-os impulzusoknál 3-szor át kellett menni a vágási vonalon, míg a legrövidebb 100 fs-os impulzusoknál akár 297-szer. A 6 ps-os impulzusoknál salakmentes vágást lehetett elérni, ezeknek az előnyöknek az ára a kis vágási sebesség 0,42-2 mm/s tartományban.

Szerző, publikáció	Muhammad 2012 [27]	Muhammad 2012 [27]	Demir 2014 [29]	Demir 2014 [29]	Catalano, 2017 [30]
Lézerrendszer	Trumpf TruMicro 5350	Coherent Libra Ti: Sapphire	IPG YLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer	Rofin StarFemto, Fiber optic	IPG YLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer
d_{f0} (μm)	5,2	100	23	32	23
f (mm)	n.a.	100	50	50	60
Hullámhossz (μm)	0,343	0,8	1,064	1,552	1,064
M^2	1,2	n.a.	1,7	1,3	1,7
d_b (mm)	n.a.	6	5,9	4	n.a.
Z_R (μm)	n.a.	1667	195	400	n.a.
Impulzus idő	6 ps	100 fs	250 ns	800 fs	250 ns
Impulzus idő (ms)	6,00E-09	1,00E-10	2,50E-04	8,00E-10	2,50E-04

10. táblázat A sztentgyártó ultrarövid impulzus idejű lézernyalábok jellemzői

	Publikáció	Muhammad 2012 [27]	Muhammad 2012 [27]	Muhammad 2012 [27]	Demir 2014 [29]	Catalano 2017 [30]
	Lézer-berendezés	Trumpf TruMicro 5350, nitinol Muhammad 2012		Coherent Libra Ti: Sapphire Muhammad 2012	IPG YLP-1/100/50/50fiber Q kapcsolt	
Anyag, mértékegység		<i>nitinol</i>	<i>Pt-Cr-ötvöztetű acél</i>	<i>nitinol</i>	<i>AZ31 magnesium alloy</i>	<i>316L</i>
Falvastagság	μm	280	67	180	200	200
Átlagteljesítmény	W	10	7	1	7,5	11
Impulzusidő	ms	6,00E-09	6,00E-09	1,00E-10	2,50E-04	2,50E-04
Impulzusenergia	mJ	0,05	0,04	1	0,3	0,44
Impulzusteljesítmény	W	8,33E+06	5,83E+06	1,00E+10	1,20E+03	1760,00
Impulzus frekvencia	Hz	200000	200000	1000	25000	25000
Vágási sebesség	mm/s	0,42	1,67	1,5	2	2
Impulzusok közti távolság az anyagon	μm	2,10E-03	8,35E-03	1,50E+00	8,00E-02	0,08
Fókuszfoltátmérő	μm	5,2	5,2	100	23	23
Vágásifolt-átfedés	%	99,96	99,84	98,50	99,65	99,65
Egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján	J/mm ³	1,64E+04	1,20E+04	3,70E+01	8,15E+02	1,20E+03
Rayleigh hossz	μm			1667	195	230
Hányszor kell átmenni a vágási vonalon		3	3	15-297		
A vágási minőség jellemzője		Salakmentes	Salakmentes			

11. táblázat Ultrarövid impulzus idejű lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel szedve

A 11. táblázatban a publikációkból hiányzó, itt kiszámolt adatokat dőlt és kövér karakterrel tüntettem fel, kiszámításuk módja azonos a korábban ismertetettekkel. Muhammad 2012 [27] PhD értekezésében megvizsgálja a sztent lézeres vágása közben a cső munkadarabon átvett víz hatását: a hűtővíz miatt itt is kicsi lesz a vágási sebesség, de a salak nem tapad rá sem a vágás aljára, sem a szemközti csőfalra, így minimális utómegmunkálás kell. Érdekes még, hogy az abláció miatt rengeteg kis energiájú impulzusra van szükség az anyag átvágásához, ez csak

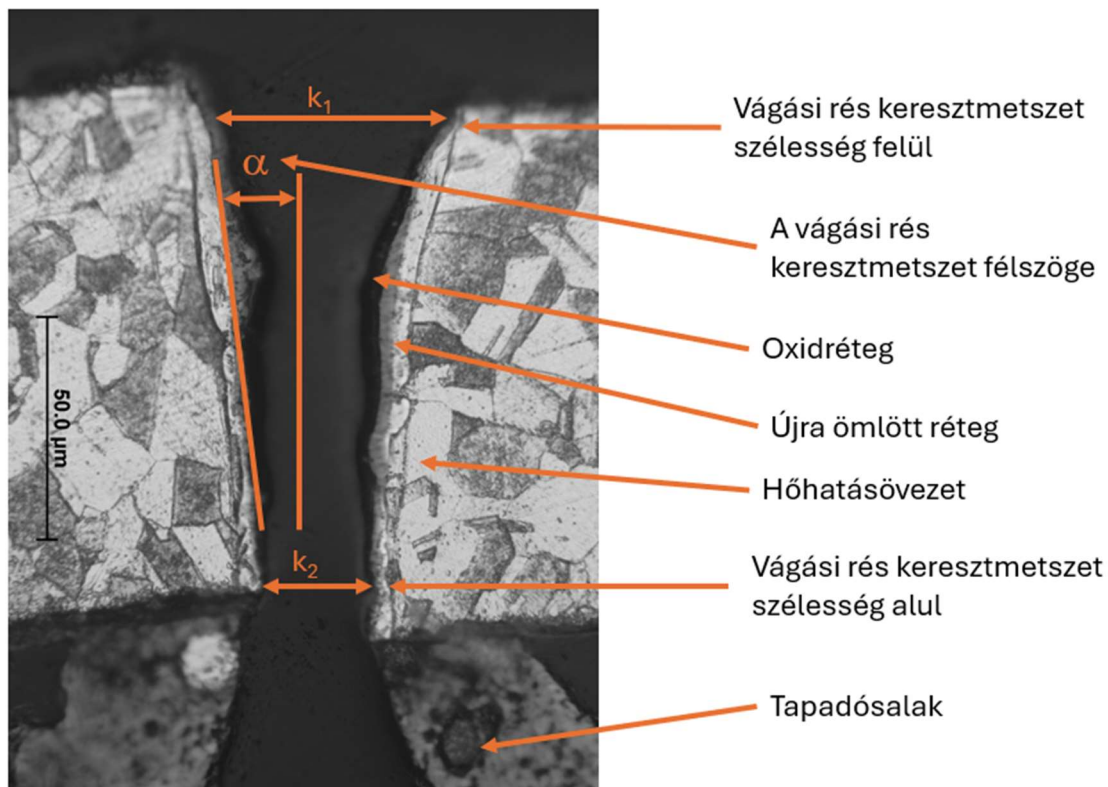
az eddigieknél nagyobb impulzusfrekvenciával lehetséges: 1–200 kHz-es értékek vannak itt. A vágásifolt-átfedés mindenhol 98% feletti, az impulzusok közti távolság az anyagon Muhammad értekezésében van hogy 2 nanométer körüli, [27] ld. 11. táblázat első oszlopát.

4.6 A vágási minőség értékelése és termékbiztonság a lézeres sztentgyártásnál

Egy korábbi publikációmban [61] axiális irányban bevágott 304 L anyagú csöveken a lézeres vágás keresztmetszetét elemeztem, amelyen a korai kísérlet miatt sok vágási hibát lehet szemléltetni. A vágási rés keresztmetszetét (11. ábra), (12. ábra) elemezve az alábbi vágási hibákat tudjuk azonosítani:

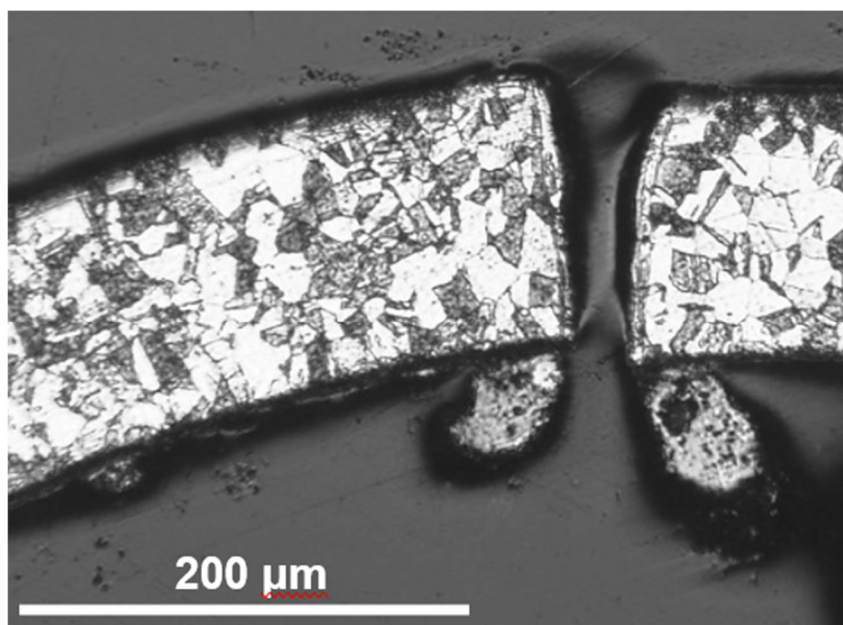
- Kúpos vágási rés keresztmetszet, mely a vágási felület szögeltéréseivel jellemezhető: (21. egyenlet). Itt az α a félszög, k_1 a vágási rés szélessége fent, k_2 a vágási rés szélessége lent, a_v a falvastagság.
- Oxidréteg az Oxigénnel, mint segédgázzal gyorsított vágás miatt van fekete réteggént a vágási rés keresztmetszet külső peremén.
- Újraömlött réteg, mely megolvasztott, majd újra megszilárdult fémréteg a vágási rés keresztmetszetben.
- Hőhatásövezet: az újraömlött réteg után következik, tulajdonképpen a lézer által hőkezelt fémréteg
- Tapadósalak: a salak az Oxigénnel gyorsított vágás miatt keletkezik, és egy része rátapad a vágási rés aljára (12. ábra), másik része a szemközti csőoldalra fröcsköl és ott is rátapad.
- Mikrorepedések az anyagban, ez itt nem figyelhető meg.
- A vágási felület felületi érdessége (bordázottsága), ez az utómegmunkáláskor eltávolításra kerül, és nehezen mérhető: optikai érdességmérő kell hozzá, a publikációkban $R_{\max}$ érték szokott szerepelni.

$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{k_1 - k_2}{2a_v} \right)$	21. egyenlet [26]
--	-------------------



11. ábra

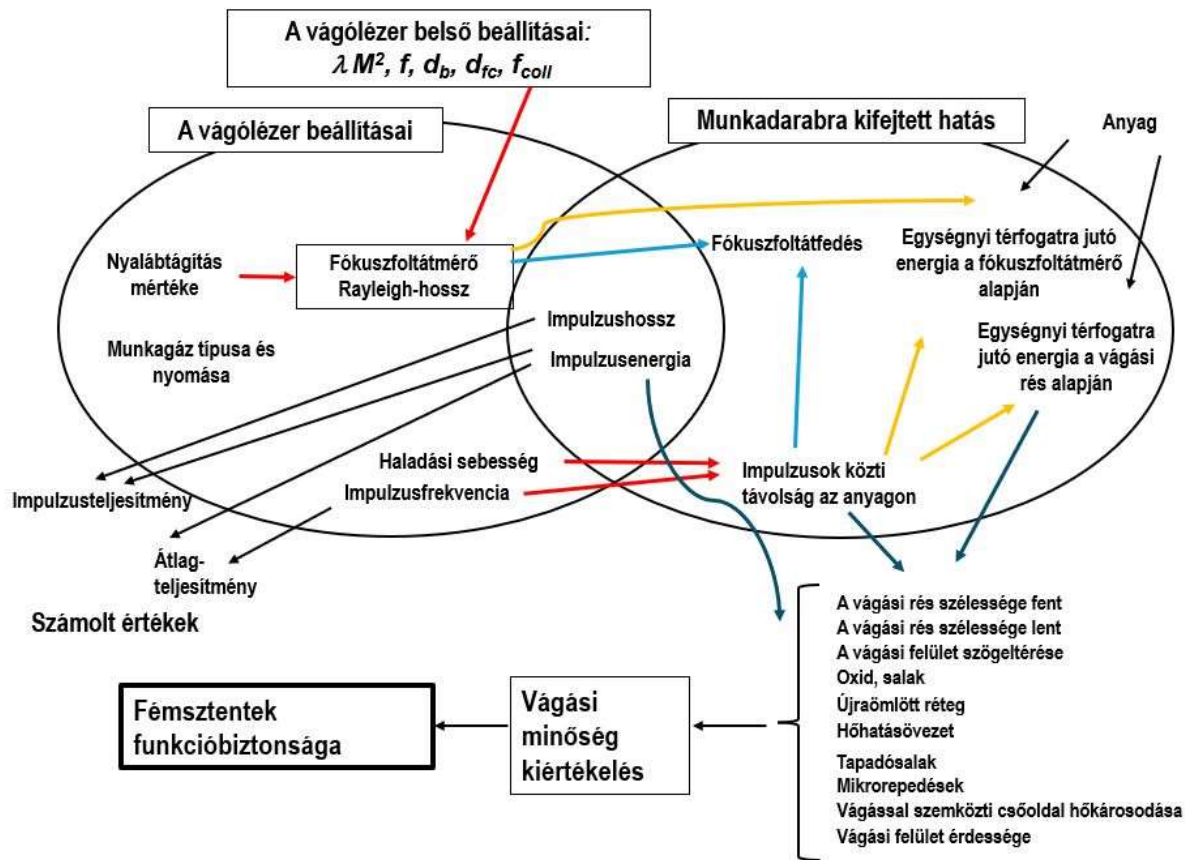
A vágási rés keresztmetszete 1,200 mm átmérőjű, 0,120 mm falvastagságú, AISI 304L anyagú rozsdamentes acél cső vágásakor



12. ábra

Tapadósarak a cső belső falán $D = 1,200 \text{ mm}$, $v = 0,120 \text{ mm}$, anyag: AISI 304L acél. A vágást a Corina sztentvágó lézerberendezéssel végeztem

A lézeres sztentvágás technológiai paramétereinek összefüggését az 1. –14. egyenlet írja le, az egyes paraméterek egymásból való kiszámolhatóságát a 13. ábra mutatja. Ezzel olyan módszert dolgoztam ki, mely a teljes paraméterrendszer kiszámolhatóságát lehetővé teszi és szemlélteti.

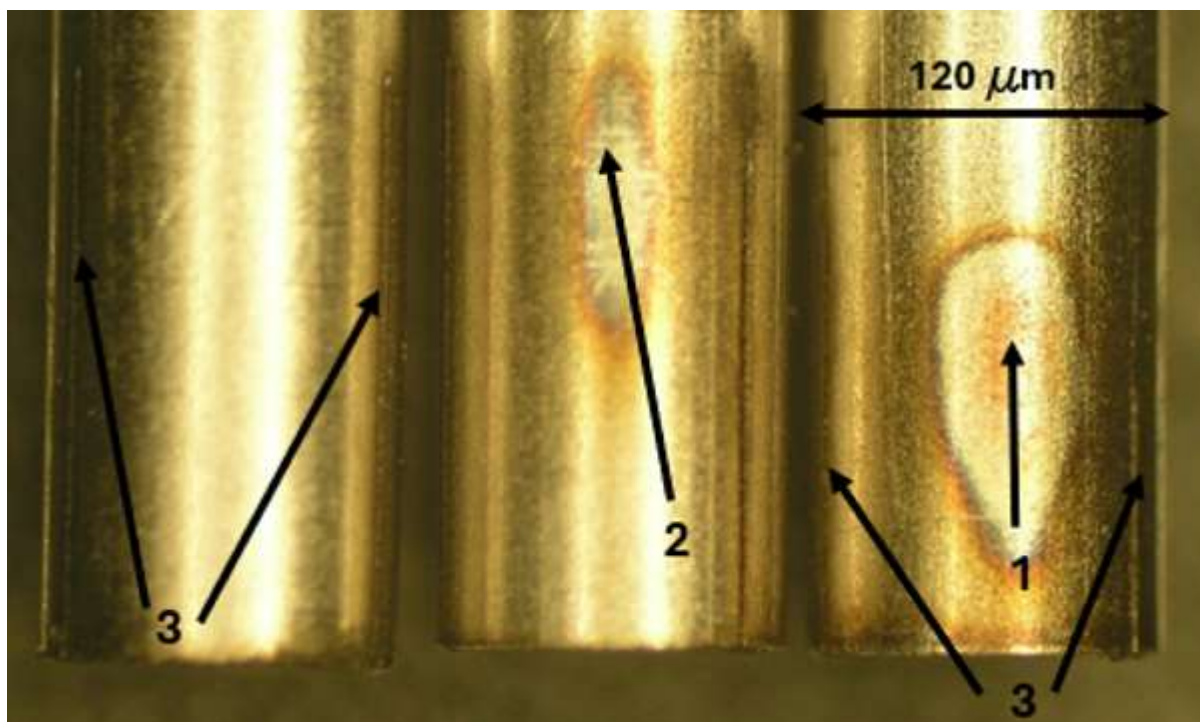


13. ábra
Sztentek lézeres vágási paramétereinek összefüggései

Végül értékelési rendszert dolgoztam ki a lézeres sztentvágás hibáinak számszerűsítésére, és ezeket súlyfaktossal szorozva és összegezve együttesen, a vágási minőséget jellemző számadat kiszámolására, az értékelési rendszert a 12. táblázat tartalmazza. A táblázatban a méreten alapuló dimenzió nélküli paramétereknél a fellépő lézeres vágási hiba nagyságát vettem alapul, amit egy referenciaértékkel osztottam. A súlyfaktoroknál kisebb súlyszámmal vettem figyelembe az utómegmunkálásnál, eltávolítható hibákat, nagyobb súllyal a maradandókat. Az utómegmunkálás lehet maratás és elektropolírozás. A vágási hiba összeg értékelésekor úgy adtam meg az éppen elfogadható határt, hogy a 11. ábra és a 12. ábra képeivel szemléltetett vágási rés keresztmetszet ezt teljesítse. A lézervágott cső vágással szemközti oldalán bekövetkezett hőkárosodást a 14. ábra mutatja, amelyen látható, hogy a bal oldali cső vágási beállításai mellett nem figyelhető meg hőkárosodás.

Paraméter	Méreten alapuló dimenzió nélküli paraméter	Súlyfaktor	Indoklás
Hőhatásövezet	Szélesség/10 μm	0,5	Utómegmunkálással leszedhető, de viszi az időt
Újraömlött réteg	Szélesség/5 μm	0,5	
Oxidréteg	Szélesség/5 mikrométer	0,5	
Tapadósalak	Salak magasság/20 μm	0,5	
Vágási felület szögeltérése	Félszög° / 5°	2	Az utómegmunkálás ellenére megmarad, csak lekerekedik
Mikrorepedések	Mélység/2 μm	0,5	utómegmunkálással leszedjük, de viszi az időt
Felületi érdesség	$R_{\text{max}}/2 \mu\text{m}$ becsülhető	0,1	
A vágási rés szélessége fent	Szélesség/20 μm	1	A sok olvadt anyag sok salakot és sok fröcskölést okoz, bár utómegmunkálással leszedhető
A vágási rés szélessége lent	Szélesség/20 μm	0,5	
Hőhatás a cső túlsó oldalán	Szélesség/10 μm	3	Nem megengedhető
Vágási hiba összeg			0-3 kiváló, 4-6 jó 7-10 elfogadható 11-től nem elfogadható

12. táblázat Szent vágási hibák értékelési rendszere



14. ábra

Termikus elszíneződés (hőkárosodás) a cső lézeres vágással átellenes külső falán 1 – Erős hőkárosodás, 2 – Gyenge hőkárosodás, 3 – Másik vágási vonalak

Paraméter	Méreten alapuló dimenzió nélküli paraméter	Súly faktor	Mért érték 1	Mért érték 2	Mért érték 3	Mért értékek átlaga	Mérő- szám
Hőhatásövezet	Szélesség/10 μm	0,5	3,2	2,5	3,2	3,0	0,30
Újraömlött réteg	Szélesség/5 μm	0,5	5,4	3,4	5,5	4,8	0,48
Oxidréteg	Szélesség/5 μm	0,5	2,3	2,9	2,5	2,6	0,26
Tapadósalak	salak magasság/20 μm	0,5	61	44	55	53,3	1,33
Vágási felület szögeltérése	félszög $^{\circ}$ / 5°	2	10	6	8	8	3,20
Mikrorepedések	mélység/2 μm	0,5	0	0	0	0	0
Felületi érdesség	$R_{\text{max}}/2 \mu\text{m}$ becsülhető	0,1	4	5	3	4	0,20
A vágási rés szélessége fent	Szélesség/20 μm	1	59	48	52	53	2,65
A vágási rés szélessége lent	Szélesség/20 μm	0,5	24	26	24	24,67	0,62
Hőhatás a cső túlsó oldalán	szélesség/10 μm	3	0	0	0	0	0
Vágási hiba összeg							9,03
						Minősítés	Elfogad- ható

13. táblázat Példa a vágási minőség értékelésére

Végül a 13. táblázat egy példát mutat a vágási minőség értékelésére, melyhez a 11. ábra és a 12. ábra alapján a JMicroVison mikroszkópos mérőszoftverrel végeztem sorozatméréseket. Az értékelés alapja a 12. táblázat, az értékelés eredménye a 9,03 dimenzió nélküli számmal jellemezhető vágási hiba összeg, mely még éppen elfogadható. Ezzel kidolgoztam egy értékelési rendszert arra, hogy hogyan hatnak a sztent termékminőségére és funkcionális biztonságára a lézeres vágáson alapuló gyártási hibái. Az a lényege a funkcionális biztonság, hogy ha a lézerrel vágott sztenten meg is jelennek vágási hibák, az utómegmunkálással annyira

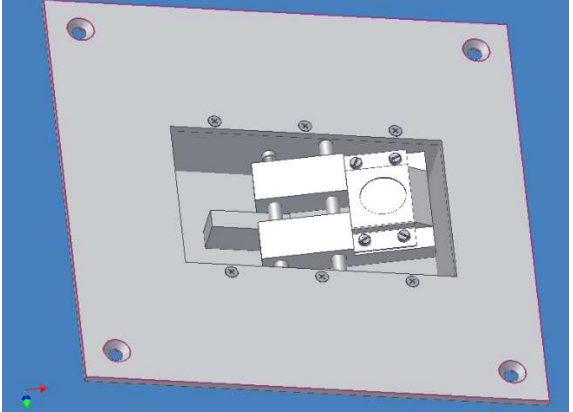
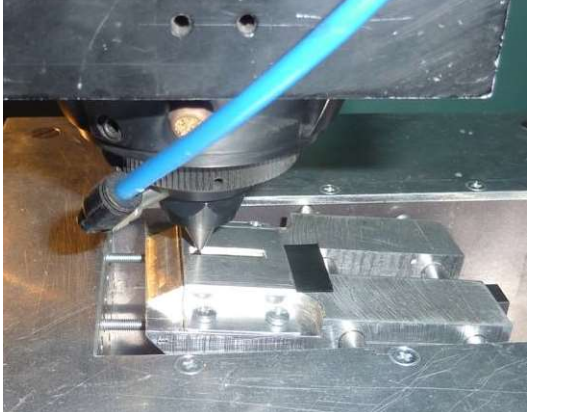
kell eltüntetni, vagy mérsékelni azokat, hogy az emberi szervezetbe beültetett sztent emiatt ne okozzon problémát. Szinte valamennyi lézeres vágási publikációban oxigént használtak segédgázként a vágás gyorsítására, de fokozódik emiatt az oxidréteg, újraömlött réteg, hőhatásövezet, salak képződése. Úgy kell meghatározni a sztent borméretét, hogy az utómegmunkálás után adódjon ki a funkció biztonságos ellátásához megfelelő méret. Ha sikerül a vágási rést csökkenteni az egységnyi térfogatra jutó energia csökkentésével, akkor csökken a tapadósalak mennyisége és a salak kifröccsenése is, így kevesebb utómegmunkálás kell, és a vágási sebesség is nagyobb lesz.

4.7 Az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatának elemzése rozsdamentes acél fólia fúrása esetén

A lézeres fúrási kísérletekből kiderült, hogy az ún. mikroszekundumos lézerekkel nem lehet olyan kis átmérőjű furatot fúrni, mint a fókuszfoltátmérő (4. ábra) átmérője, hanem csak kb. háromszor nagyobb, és ezt is csak a lézernyaláb fókuszában [62]. Ez azért van így, mert a laterálisan Gauss-eloszlású impulzusenergia még a lézerfolt határán túl is elég nagy energiatartalmú az anyag elolvasztásához. A felhasznált lézer működési diagramja, amiből a beállítások jobban megérthetőek az [63] publikációban találhatóak. A kísérletekhez a korábban ismertetett Corina lézeres megmunkálórendszert használtam.

A kísérlet során állandó volt az anyag (1.4301 típusú ausztenites korrózióálló acél fólia), az anyagvastagság (0,02 mm), az impulzusidő (0,12 ms), a nyalábtágító állása (4-es szorzó a tágítatlan nyalábhoz képest). Változók voltak: a segédgáz (oxigén, illetve nitrogén), a segédgáz nyomása (2 és 5 bar), a lézerimpulzus energiája (10, 30, 50 mJ), a fókuszpozíció (a fókuszfoltához képest $\pm 0,7$ mm között).

A fóliába a különböző fókuszpozícióban egyetlen lézerimpulzus által fúrt furatok létrehozásához a szinuszmechanizmus [64], elvén működő fóliafeszítő készüléket terveztünk (15. ábra), és gyárttattam le, melynél a kifeszített fólia ferdesége mérőhasábbal állítható.

	
<i>15. ábra</i> <i>A fóliafeszítő szerkezet modellje</i>	<i>16. ábra</i> <i>A fóliafeszítő szerkezet a lézerfej alá, a mozgatórendszerre szerelve</i>

A fóliafeszítő szerkezet közepére feszített fólia a mérőórás vízszintmérés kis erőhatása alatt is behajlott, ezért valószínűleg a segédgáz nyomása alatt is behajlott volna. Ezért a kezdeti tervhez képest a fólia befogását egy 4 mm-es sávra korlátoztuk. A másik változás az asztal két helyen történő csavarorsós alátámasztása volt, azért, hogy az asztal ne süllyedjen le a segédgáz nyomása alatt (16. ábra) A csavarorsós alátámasztások, melyek egy ferde felületre szorítanak rá a fűvókától balra látszanak.

Az első furatsorozatok 5 bar nyomással, O₂ segédgázzal, 50, 30 és 10 mJ impulzusenergiával különböző fókuszsíkból készültek. Egy furatsorban kb. 60 db furatot hoztunk létre. A kísérleti beállítások dokumentálására adatlapokat használtuk, amelyek az alábbi kísérleti feltételek mindegyikét rögzítik:

- Nd:YAG rudat a rezonátorban gerjesztő villanócső feszültsége, V
- impulzusfrekvencia, Hz
- impulzusidő, ms
- impulzusenergia, mJ
- impulzusteljesítmény, W
- a lézer átlagteljesítménye, W
- impulzusok közötti távolság, mm
- haladási sebesség, mm/s
- mozgatórendszer gyorsulása, mm/s²
- segédgáz fajtája
- segédgáz nyomása, bar

- fűvókátávolság (az anyag felszínétől), mm
- a lézerfejen beállítható fókuszállás mm-ben: a fókuszfolt síkjának relatív távolsága egy, a lézerfejen található, nyalábterjedésre merőleges síkhoz képest
- nyalábtágító-állás: 4
- anyagminőség jele
- anyagvastagság, mm
- fóliafeszítő szerkezet mérőhasáb alátét ferdesége, fok
- villanólámpa által leadott impulzusok száma
- környezeti hőmérséklet, °C
- relatív páratartalom, %
- plazmaképződés megfigyelhető-e?

A második kísérletsorozatban 5 bar, majd 2 bar nyomású N_2 segédgázzal (18. ábra) 0,02 mm-es rozsdamentes acél fólián (ANSI 304) felülről lefelé 50, 30, 10 mJ impulzusenergiával különböző fókuszsíkokban készült furatokat készítettünk.

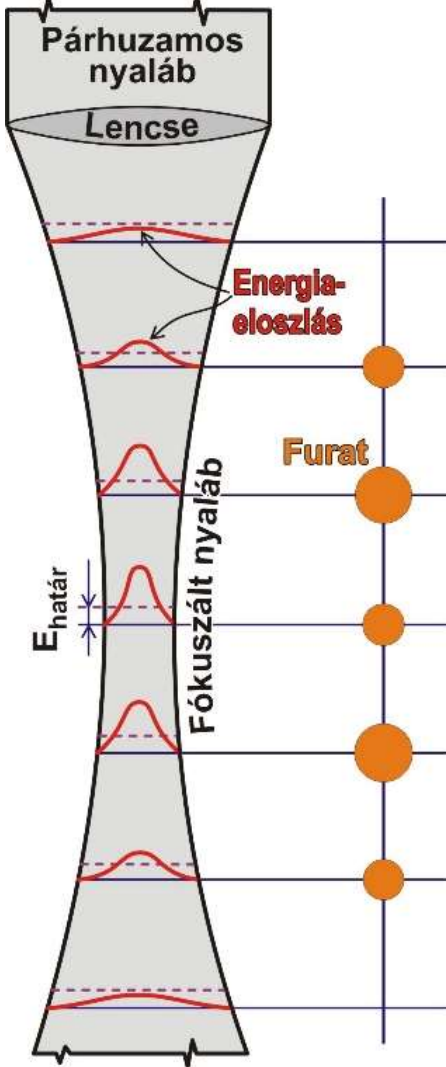
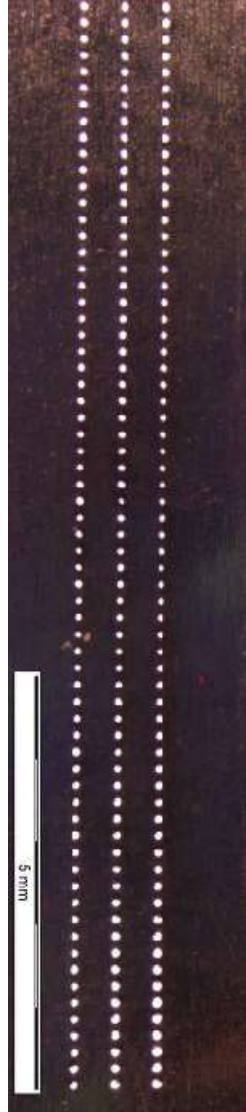
Az impulzusenergia Gauss-eloszlása elosztva azon területtel, amelyre szétoszlik, J/m^2 -ben ábrázolható a különböző függőleges síkokban. Ha ez eléri egy $E_{\text{határ}}$ energiasűrűséget, ami az olvasztási határ az adott anyagra, akkor a Gauss-eloszlás és az $E_{\text{határ}}$ energiasűrűség metszéseként létrejön az olvasztott furat átmérője. Ez az átmérő az ábrából leolvasható módon a fókusz síkjában a legkisebb, a fókuszsíktól távolodva nő, majd még jobban távolodva csökken, ez a kísérletekből is beigazolódott (18. ábra)

A 17. ábra tendenciákat mutat, mert a fókuszfolt síkjában a lézer a nyalábátmérőnél nagyobbat fúr.

A fentiekből következik, hogy a fúrási kísérlet elvégzésével választ lehet adni rá, hogy hová esik a fókuszált nyaláb fókuszfoltja. Az egyimpulzusos fúráskor a furat közepénél az anyag valószínűleg párolog is, de a furat szélén a csökkenő besugárzott felületi teljesítmény miatt már csak olvasztás történik, ezért a furatátmérőt olvasztási átmérőnek lehet nevezni.

Az egy munkamenetben készült furatsornál csak relatív koordináták léteznek, mert a lézerhez képesti pozíciót nehéz meghatározni. A Z-koordinátatengely a lézersugárzás terjedési irányába esik. A furatok közül a lézerfejhez legközelebbit definiáljuk nulla Z-koordinátájúnak. A 19 mm-es mérőhasáb magasságából trigonometriai összefüggésekkel meghatározható, hogy két

furatközéppont között 18 mikrométer Z-koordináta eltérés tartozik. A kísérleteket 4-es nyalábtágító-állásnál végeztük.

	
<i>17. ábra</i> A fókuszált lézernyaláb különböző vízszintes síkjaiban különböző méretű furatok jönnek létre	<i>18. ábra</i> A második kísérletsorozatban, 2 bar nyomású N₂ segédgázzal készített furatsorozatok

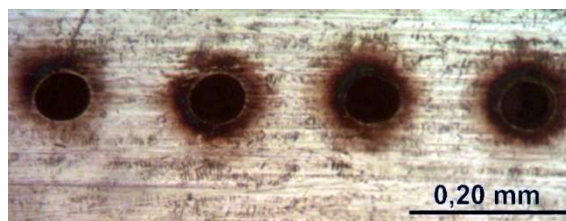
A furatokat Zeiss anyagvizsgáló mikroszkópra szerelt 3 megapixeles kamerával lefényképeztem, és Scope Photo képelemző programmal, hárompontos furatmérési eljárással mértem meg úgy, hogy a furatok szabálytalanságait is figyelembe vettem olyan módon, hogy a furatkontúrra illesztett körön kívül és belül eső területek közelítőleg azonosak legyenek. Ha a

furatokat ideális körnek tekintjük és összevetjük a fólia 5 fokos ferdesége miatti legnagyobb és legkisebb átmérő közötti különbséget, akkor 100 mikrométeres furatra alkalmazva ez elhanyagolható, 0,4%-os különbséget jelent.

Az a tévképzet él az emberek fejében, hogy a lézerrel megmunkált felületek mindig „szépek” és szabályosak. Ha mikroszkóppal megvizsgáljuk ezeket az egy impulzussal készített furatokat, látjuk, hogy a fentiek nem igazak, még a szakirodalomban közölt egyes képek sem felelnek meg ennek [65]. Milyen eltéréseket tapasztalunk az ideálistól, és mik az eltérések okai?

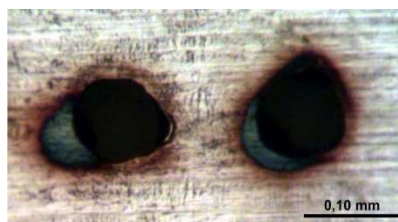
A kísérletek tapasztalatai

Fontos jellemzője a fúrásnak a hőhatásövezet megjelenése a furat körül, mely az anyag felületének elszíneződésében is tetten érhető (19. ábra). Ennek az az oka, hogy a lézernyaláb olvasztási átmérőn kívül eső részének egységnyi felületre eső energiatartalma még mindig jelentős egy adott körgyűrűn belül. Különösen a fókuszolt környezetében figyelhető ez meg, ahol a legnagyobb az impulzusenergia koncentrációja. Ezzel kapcsolatban a következő megjegyzéseket tesszem



19. ábra

30 mJ impulzusenergiával készített furatsor közepe: nagy hőhatásövezet a furatok körül



20. ábra

30 mJ impulzusenergiával készített furatsor vége: szabálytalan felső kontúrú furatok

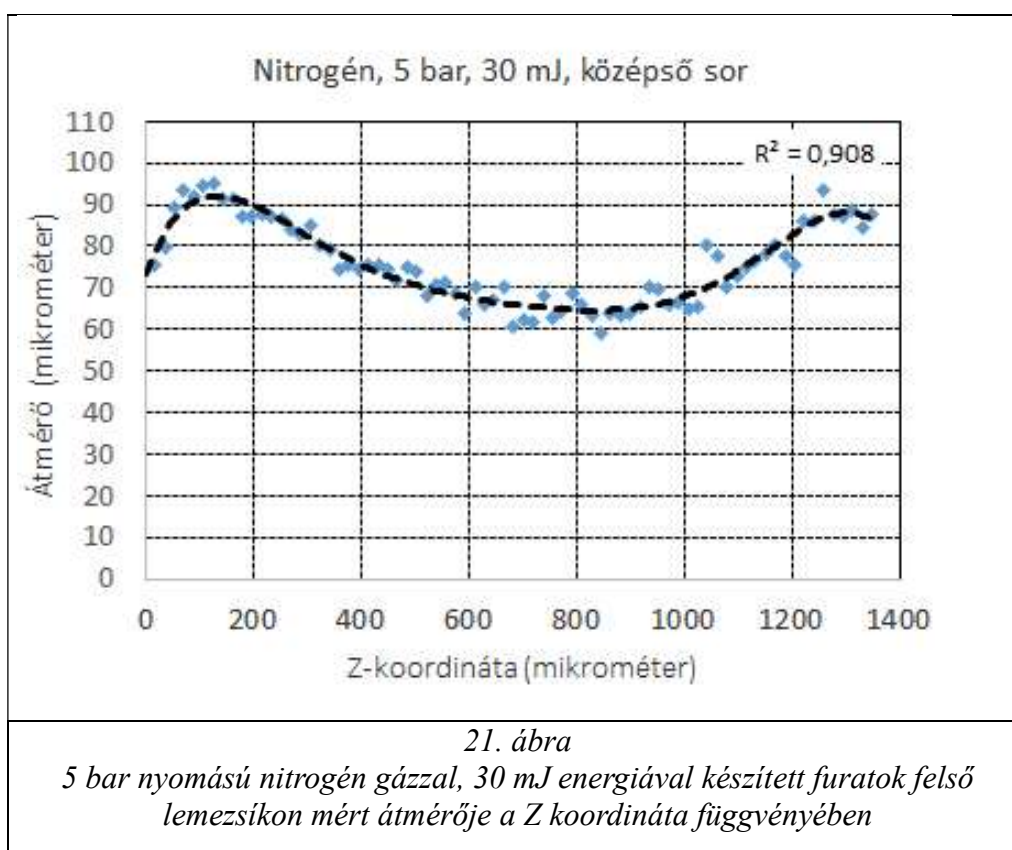
- Ha oxigén segédgázt használunk, akkor a legbelső rétege a furatnak az oxidréteg.
- A furat falán lévő salakréteg alatt található az újraömlött réteg, amely a lézernyaláb által megolvasztott és újra megszilárdult anyagréteg.

- Az alsó kilépő nyíláson általában nagyobb mennyiségű olvadt anyag rakódik le, ezt tapadósalaknak szokták nevezni, az MSZ EN ISO 17658:2015 [66] szabvány alapján.
- A nem kör alakú felső furatkontúr a lézernyaláb aszimmetriája, a megmunkálásnál fellépő nemlineáris folyamatok és a plazmaképződés miatt alakul ki (20. ábra)
- Kúpos lesz a furat keresztmetszete, mert a megmunkált fólia felső részén több energia nyelődik el.
- Erős furatátmérő-ingadozás alakult ki a plazmaképződés miatt az elvi fókuszsík feletti és alatti tartományban.

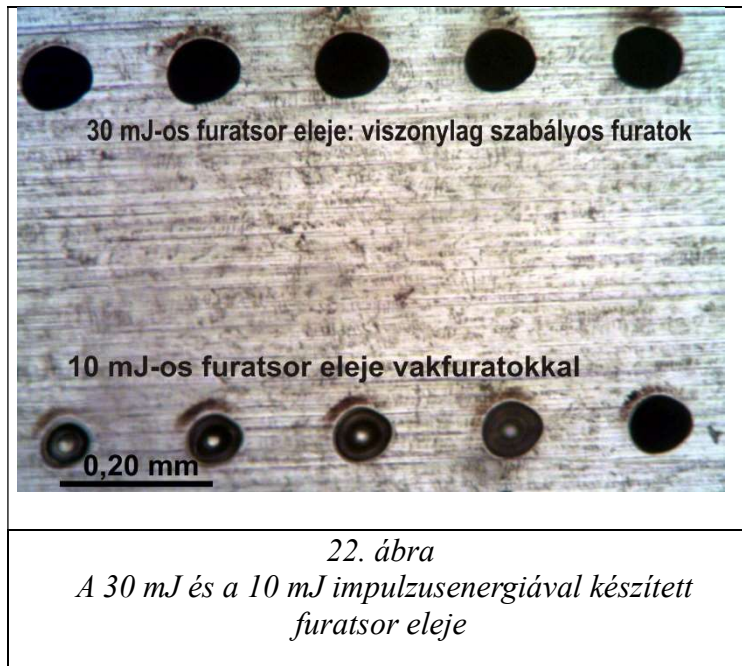
Jó, ha ezekkel a jelenségekkel tisztában vagyunk. Ennek ellenére lehet törekedni olyan lézeres megmunkálási beállításokra, melyek az adott anyagnál és anyagvastagságnál jó minőségű felületet adnak, ezek általában optimalizálás eredményei, vagy utólagos megmunkálással, pl. elektropolírozással érhetők el.

A kisebb energiájú egyhelyben leadott impulzusokkal – ütve fúrással – végzett fúrással szabályosabb furatokat lehet készíteni a szakirodalom szerint, de ilyenkor kisebb a termelékenység.

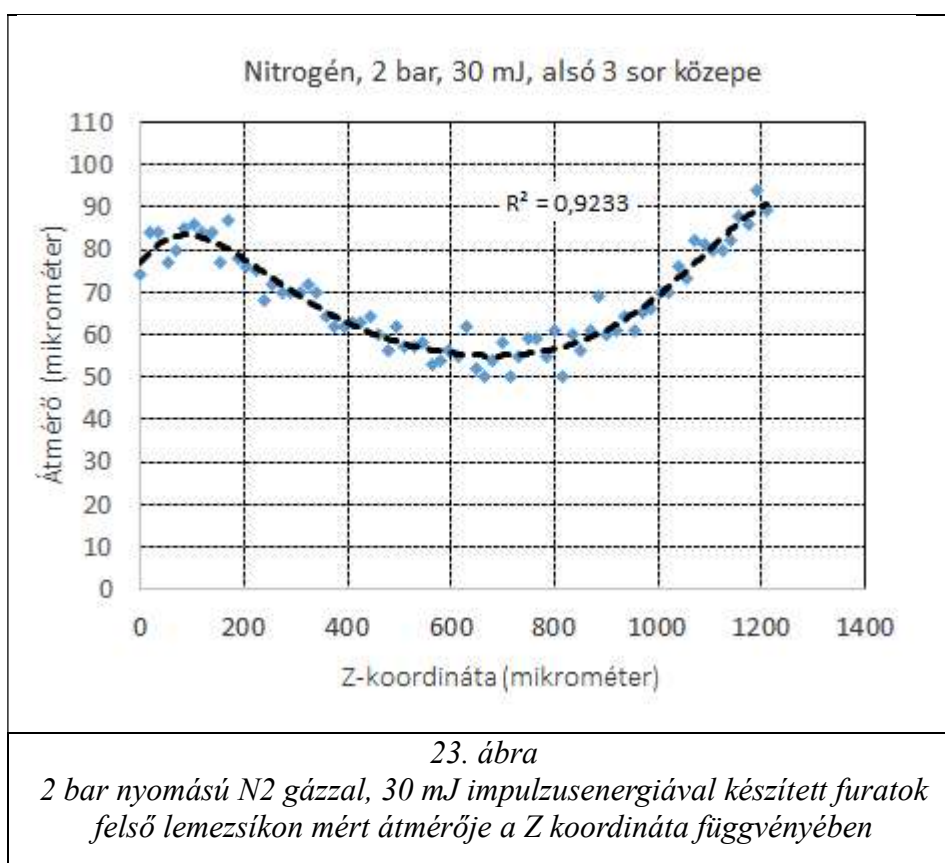
Most vizsgáljuk meg a furat olvasztási átmérője és a fókuszpozíció összefüggésének megismerésére irányuló kísérlet eredményeit:



A 21. ábra mutatja 5 bar nitrogén segédgázt használva, 30 mJ impulzusenergiával készített furatok fókuszpozíció-furatolvasztási átmérő függvényeit; a Z-koordináta a legfelső furattól való függőleges (a fókuszált lézernyaláb tengelye irányába eső) eltérést jelöli. Elég ezt az egy függvényt megmutatni, mert a másik kettő: a 10 és 50 mJ energiával készített furatok átmérői ugyanezt a tendenciát követik: a mért furatokra illesztett trendvonal alja mindhárom függvéynél 65 mikrométer körüli, tehát az impulzusenergiának a furatok átmérőjére gyakorolt hatása elhanyagolható. A 17. ábra alapján megjósolható furatátmérő-csökkenés az első a görbe bal oldalán a fűvókához közeli tartományban látszik. A kisebb impulzusenergia inkább ott játszik szerepet, hogy a fűrés létrejötte eltolódik a fókusz irányába (ld. 22. ábra)



Valószínűleg a plazmaképződés miatt a fókusz közelében és a fókuszáló lencsétől távolabb (nagyobb Z koordinátájú helyeken) erősen ingadozik a furatátmérő. Pontosabban fűrni a görbe első egynegyedénél, a 0–300 mikrométer tartományban lehet. Lássuk a furatgeometriákat: a 22. ábra szabályosabb kontúrú furatokat ábrázol. 2 bar nitrogén segédgázt használva 30 mJ impulzusenergiával készített furatok fókuszpozíció – furat olvasztási átmérő függvényét mutatja a 23. ábra.



A kísérletekből kiderül, hogy 2 bar nyomású nitrogént használva minél nagyobb az impulzusenergia, annál nagyobbak a furatok. A mért furatokra illesztett trendvonal alja 50 mJ-nál 58 mikrométer, 30 mJ-nál 55 mikrométer, 10 mJ-nál 50 mikrométer körüli. A legnagyobb furat átmérője rendre 100, 90, 80 mikrométer, 50, 30, 10 mJ energiánál. A4. ábráról megjósolható furatátmérő-csökkenés a 21. ábra és a 23. ábra bal oldalán a fúvókához közeli tartományban látszik. Hogy a nitrogén segédgázt takarékosan használjuk, ezért a furatátmérő változtatásához érdemes a 2 bar-os beállítást használni, így kevesebb fogy belőle.

A kísérletek eredményeiből kitűnik, hogy az impulzusenergiának nincs lineáris hatása a furatátmérőre, a furatok nem követik a fókuszált nyaláb keresztmetszetét, és ingadozó átmérőjűek. A nemlineáris hatások okait a következőkben látjuk:

- Az elpárologtatott anyag párányomása kilöki az olvadt anyagot a furatból.
- Plazmaképződés (lilás színű, gömbölyded csóva) figyelhető meg; a plazma nagy optikai sűrűségű ionizált gáz, mely a lézersugárzás jelentős részét abszorbeálja.

Összegzés

Megvizsgáltam az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatát 20 mikrométer vastagságú, ausztenites szövetszerkezetű rozsdamentes acél fólián. Elemeztem a fókuszált nyalábkeresztmetszet jellemzőinek – a lézer foltméretnek és a Rayleigh-hossznak – a hatását. A kísérletekből kiderült, hogy csak a lézernyaláb foltméreténél kb. háromszor nagyobb furatot lehet elkészíteni. E méret alá nem lehet lemenni fúráskor, mert a Gauss-eloszlású lézerimpulzus még a lézerfolt határán túl is elég nagy energiátartalmú az anyag elolvasztásához.

A kísérlet során vizsgáltam a fókuszpozíció, a nitrogén segédgáz nyomása és az impulzusenergia furatátmérőre gyakorolt hatását. 5 bar nyomáson a fókuszpozíció-furatátmérő függvények majdnem azonos lefutásúak voltak, impulzusenergiától függetlenül. 2 bar nyomáson a nagyobb impulzusenergiához a fókuszpozíció-furatátmérő függvényen nagyobb minimális és maximális furatátmérők tartoztak. Ezzel a beállítással lehet legjobban befolyásolni a furatátmérőt.

A kísérletekből feltételezhető, hogy a lézeres fúrásnál olyan nemlineáris hatások lépnek fel, mint pl. a plazmaképződés, az olvadt anyag gőznyomása. Ezek okozzák a furatok szabálytalanságait és átmérőingadozását elsősorban a fókuszfolt környékén, ahol a plazmaképződés fellép, és ez alatt. Legszabályosabb furatokat a fókuszpozíció-furatátmérő függvény első egynegyedénél, a 0–300 mikrométer tartományban lehet készíteni.

4.8 Az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatának elemzése vörösréz fólia fúrása esetén

A kísérletekhez a korábban ismertetett IPG-gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú szállézeret használtuk. A kísérlet célja hasonló az előbbi fejezetben ismertetetthez, csak az anyag más (rézfóliát használtam): a különböző lézerbeállításokhoz tartozó furatátmérő-Z-koordináta függvények elemzése. A kísérletekhez az előző fejezetben ismertetett – általam tervezett – fóliafeszítő eszközt használtam fel.

A megmunkálandó anyagok tulajdonságai

Miért jelent nagy kihívást a lézer hullámhosszán erős reflexiót mutató anyagok fúrása? 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 rész áteresztődik, tehát 21. egyenlet [26][67]:

$P_0 = P_r + P_a + P_t$	22. egyenlet
-------------------------	--------------

Itt P_0 az összes, P_r a visszavert, P_a az elnyelt, P_t az áteresztett teljesítményt jelöli.

Tömbi anyagok megmunkálásánál elhanyagolható az áteresztett teljesítmény, tehát minél nagyobb energiahányad reflektálódik, annál kevesebb teljesítmény hasznosul.

Ha $P_0 = 1$, akkor P_a az abszorpciós tényező, P_r a reflexiós tényező adott anyagra és adott hullámhosszra vonatkozóan.

Miért jelent nagy kihívást a lézer hullámhosszán erős reflexiót mutató anyagok fúrása? Mert az anyag felületére érkező lézerimpulzus energiájának nagy része visszaverődik és csak a maradék hasznosul (ld. 14. táblázat)

Anyag	A (%)	R (%)
Rozsdamentes acél [68]	31	69%
Ezüst [5]	3	97%
Vörösréz [5]	4	96%

14. táblázat

Anyagok Abszorpció (A) és Reflexió (R%) adatai a lézer hullámhosszához közeli 1064 nanométeres hullámhosszon

A korábbi kísérletünkben [69] 1.4304 minőségű rozsdamentes acélt használunk. A 14. táblázat alapján megjósolható, hogy az ehhez képest sokkal erősebben reflektáló ezüstöt és rezet nehezebb megmunkálni. Most derül majd ki, hogy a rendkívül kicsire fókuszált lézerfoltméret okozta nagy teljesítménysűrűség előnyt jelent-e. Problémát okozhat az is, hogy a visszavert lézersugárzás visszajut a lézerbe, ott károsodást okozva [70]. A kísérletek során a lézerfej függőleges volt, alatta a próbadarabokat a vízszintessel bezárt 8-fokos szögben feszítettük ki, így a beesési és visszavert sugárzás 16 fokot zárt be, tehát nem jutott vissza sugárzás a lézerbe.

A kísérleti munka

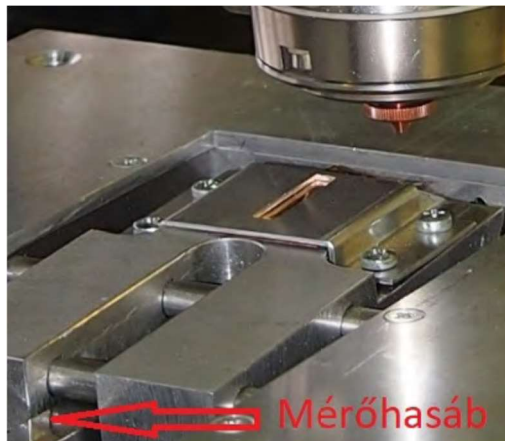
A kísérletnél használt réz fóliáknak a lézerfej alatti vízszinteshez mért, adott szögű kifeszítéséhez az előző fejezetben ismertetett fóliafeszítő készüléket használtuk. A készülékben a fólia szöge mérőhasábbal állítható. A 17,5 mm-es mérőhasáb-beállításhoz a vízszintessel bezárt 8°-os szög tartozik. A lézerre szerelt készüléket a 24. ábra és a 25. ábra mutatja.

A közös kísérleti beállítások a következők voltak:

- fókuszálás a lézerfejen: -2,6 mm;
- segédgáz: nitrogén 5 bar nyomáson.



24. ábra
A mérőhasábbal állítható fóliafeszítő a lézerfej alatt.



25. ábra
A fóliafeszítő közelebről

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 15. táblázatban láthatók.

A 26. ábra a rézfólia furatait mutatja 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 27. ábra az olvasztási határenergia, és a fókuszált nyaláb kölcsönhatását ábrázolja. A fókuszoltól távol nagyon szétterül a nyaláb, itt már nem elég a felületegységre jutó energia az anyag átolvasztásához. Ilyen furatkezdeményt mutat a 29. ábra. A 27. ábra és a 28. ábra furatátmérőinek Z koordinátától függő régiói összepárosíthatók:

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

— 3. régió: A maximális furatok: itt a nyaláb energiaeioszlása a legnagyobb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt.

— 4. régió: A minimális furatok: itt a nyaláb energiaeioszlása a legkisebb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt, tehát itt van a nyaláb fókusza.

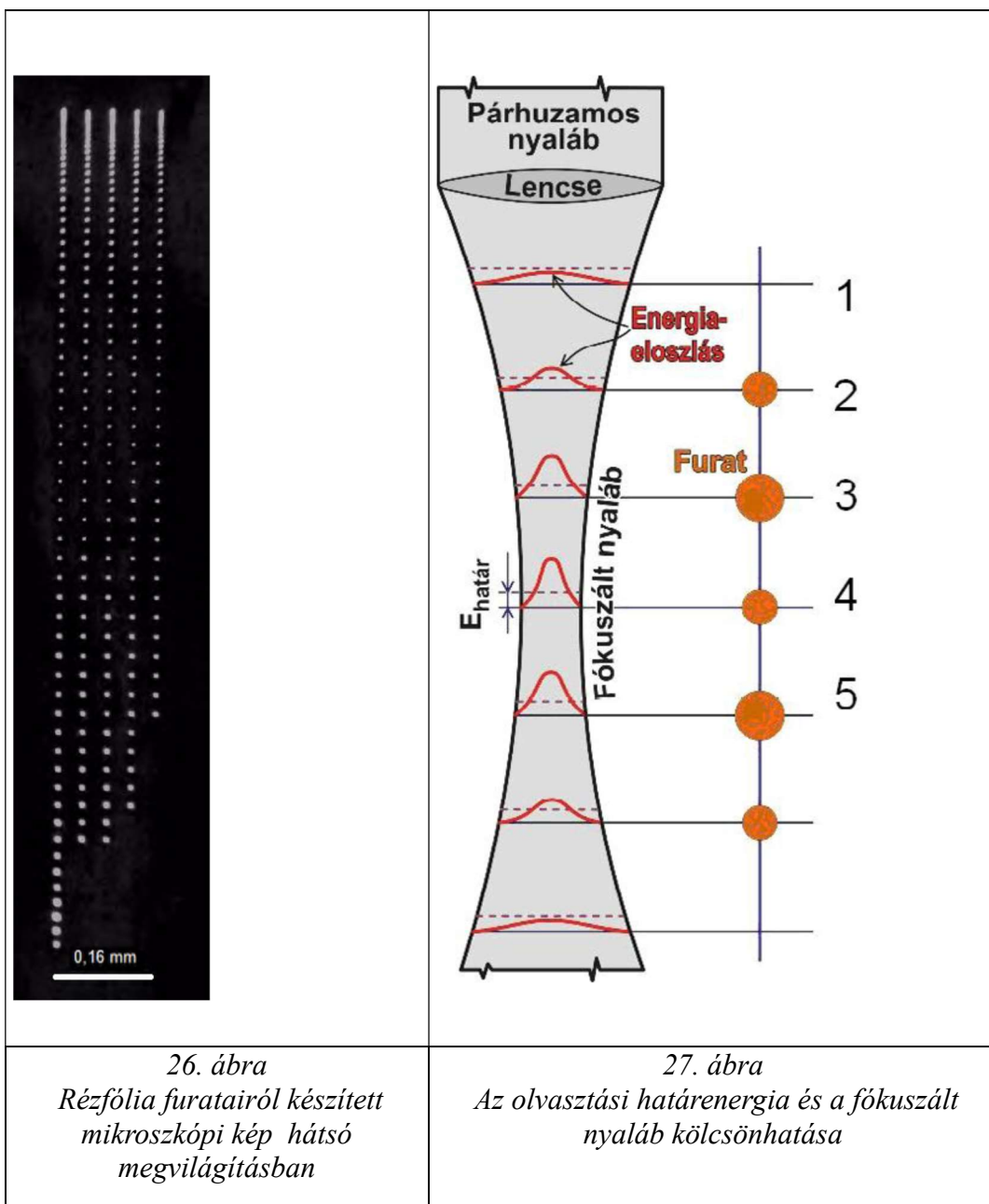
— 5. régió: Ismét nagyobb furatok: a nyaláb energiaeioszlása a nagyobb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt.

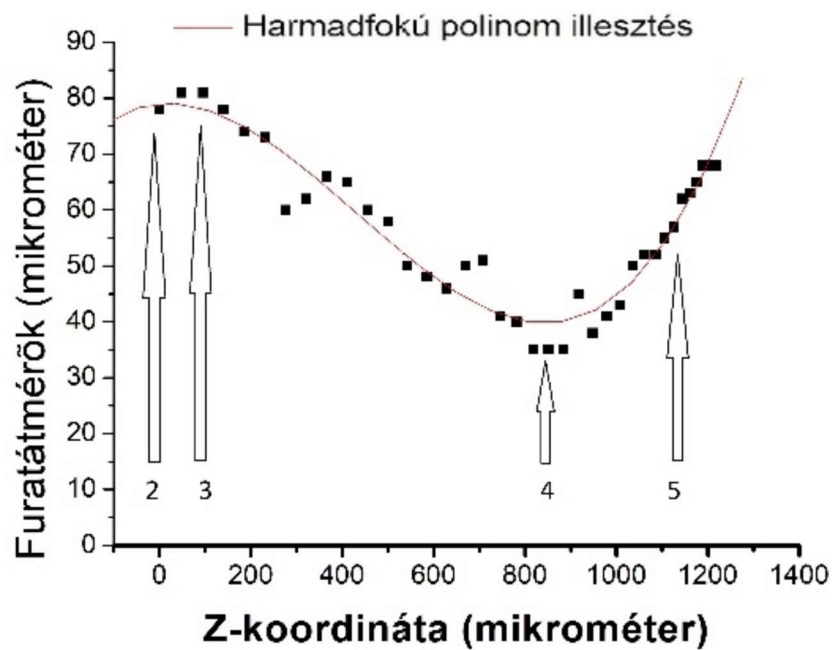
A 30. ábra egy, a fúvókához közel eső furat képét mutatja, ahol a nitrogén gáz szétfröcskölte az olvadt anyagot: itt nehéz átmérőt meghatározni, mert a furatok kráter alakúak és lefelé szűkülően kúposok. Ez esetben négy zóna különböztethető meg:

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 tapadósalak is beárnyékol (ld. 31. ábra ábra).

A fúvókától távolabbi furatoknak (32. ábra) jobb a kontúrjai és könnyebben mérhetők – bár szabálytalanok, mivel inkább ellipszisre emlékeztetnek. A furatok körül található nagy

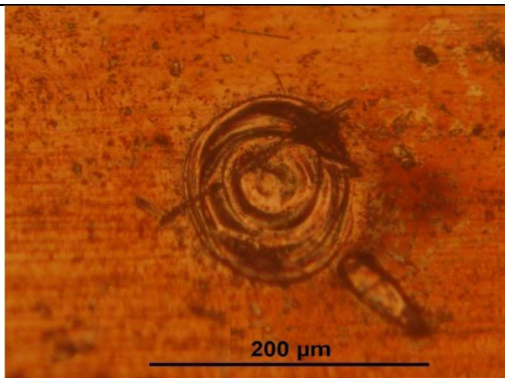
átmérőjű hőhatásövezet az erősen reflektáló anyag miatt alakult ki: itt nem elég az impulzusenergia az anyag átolvasztásához. A különböző fókuszhelyezettel létrejövő furatok átmérőjének Z koordinátafüggvénye közel állandó volt, az impulzusadatoktól függetlenül. Ennek oka, hogy az impulzusenergia csak kb. 25%-kal változott, és a furatok átmérőinek szórása nagy volt (ld. 30. ábra magyarázatát).





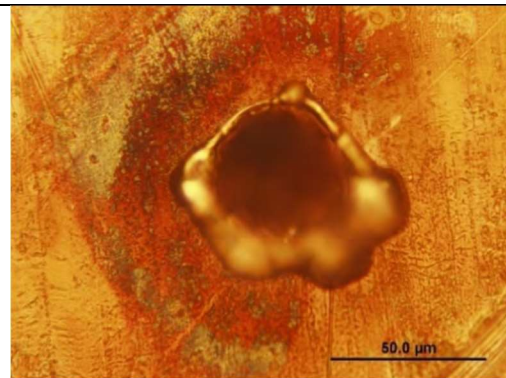
28. ábra

Rézminta 213 mJ impulzusenergiával létrehozott furatainak Z koordinátafüggvénye és annak régiói; $Z = 0$ a lézerfejhez közelebbi koordináta



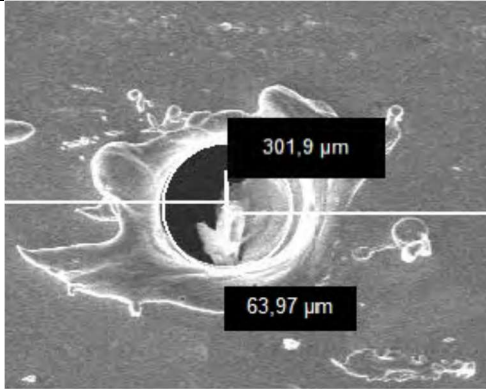
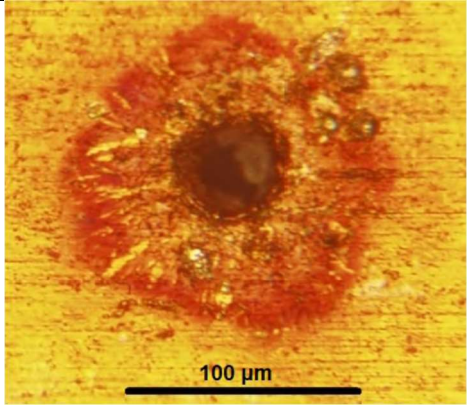
29. ábra

A szétterülő nyaláb miatt itt nem jött létre furat



30. ábra

Egy, a fűvókához közeli furat képe

	
<i>31. ábra</i> Egy, a fúvókához közeli furat képe, itt látszik a tapadósalak. 301,9 mikrométer a távolság a szomszéd furattól, 63,97 mikrométer a hárompontos furatátmérő-mérés eredménye	<i>32. ábra</i> Egy, a fúvókától távolabbi furat

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

15. táblázat

Rézfólia fúrási kísérleténél soronként egy furatsorozathoz tartozó impulzusadatok

Következtetések:

A megmunkáló lézer 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 a hatása a furatátmérőre és a furatátmérők z koordináta függvényei erős ingadozást mutatnak, ennek lehetséges okai:

- a lézeres fúrásnál olyan nemlineáris hatások lépnek fel, mint a plazmaképződés és az elpárolgott fém gőzének nyomása;
- az összes szilárdtestlézer hátránya, hogy nem adnak egyenletes impulzusokat. Ennek az az oka, hogy nem stacionárius üzemben működnek.
- Kis egyenetlenségek a munkadarabon (50 mikrométer) a furatátmérők 10%-os változását okozhatják [71].

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

4.9 A nyalábminőségi tényező romlásának becslése

A nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása fókuszfoltátmérőre és a Rayleigh-hosszra.

Előre bocsátom, hogy a nyalábminőség tényező méréséről az MSZ EN ISO 11146-1:2021 [72] 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 kétszeresén kívül” [7]. A nyalábminőségi tényező, és a fókuszált nyalábkeresztmetszet méréséhez ezen értekezésben vizsgált impulzusos üzemű lézereknél a nem folyamatos lézerműködés miatt nem használhatóak az egyszerűbb késél szkennelő vagy résszkennelő módszerek, hanem mátrixérzékelős detektorra, és a detektor nagy érzékenysége miatt több fokozatú nyalábgyengítésre van szükség olyan módon, ami nem befolyásolja a mérés eredményét: nem torzítja az eredetileg mérendő nyaláb jellemzőit [7]. Ezek nagyon drága eszközök, egy ilyen eszköz ingyenes használatáról tárgyaltunk a tulajdonos céggel. Sajnos ilyen feltételek mellett: ingyenes kiszállítás, eladás lehetősége nem áll fenn, nem álltak szóba velünk.

Amit az alábbiakban be szeretnénk mutatni: milyen a nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása 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 módusszerkezete az ideális Gauss-

energiaeloszlást követő nyalábot megközelítő TEM 00 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 lézeres megmunkáláskor a nyaláb fókuszolt közeli részét használjuk, érdekes, hogy hol van a fókusz, mekkora a fókuszfoltátmérője és a kétszeres Rayleigh-hossz, amin belül lehet dolgozni a lézerrel. 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 23. egyenlet: [32]

$d_f(z) = d_{f0} \sqrt{1 + \left(\frac{z-z_0}{z_r}\right)^2}$	23. egyenlet
---	--------------

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 publikációimban [61], [73], [74], [75], [28] elvégzett vágási kísérletekhez kötjük. A hullámhossz szerepe: a kísérletekben használt Nd:YAG lézer hullámhossza, elhanyagolható módon változik. A fókuszálólencse fókusz távolsága állandó: 50 mm volt.

A fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője egyenlő a tágítatlan nyalábátmérő d_b szorozva a nyalábtágító szorzószámával B : adott nyalábtágító állásnál mindkettő konstans, a nyalábtágító 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 következtetünk, hogy változik a nyalábminőség tényező:

1. A LASAG KLS 246 FC mikromegmunkálásra 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 nyalábtágító, mint optikai rendszer legalább 3 lencséből áll, mert 2 lencse kellene a Galilei-távcső rendszerű, fix nyalábtágításúhoz. Ezeknek a lencséknek is van képhibájuk, nézzük most a legerősebb hatásút: a szférikus aberrációt. A szférikus aberráció lényege, hogy az optikai tengelytől sugárirányban eltávolodva minél kijebb lévő gyűrűt vizsgálók, annál közelebb lesz a fókusz a lencséhez, tehát a fókusz elkenődik. A LASAG szerviz azt írta, hogy 1-es nyalábtágító állásnál vegyük ki a nyalábtágítót, hiszen ekkor az csak átengedi a kollimált nyalábot, ez is arra utal, hogy a nyalábtágító ront a fókuszálhatóságon.

3. Kaplan könyve szerint [32], erős fókuszálásnál, kis F-számoknál nem igazak az r_{f0} fókusz sugár és z_r képletei, hanem korrekciókat kell bevezetni (itt $F = f/d_b$) 24. egyenlet:

$r_{f0} = \frac{2\lambda F}{\pi K} + \frac{k_{sa} d_b}{2F^2} = \frac{2\lambda f}{\pi d_b K} + \frac{k_{sa} d_b^3}{2f^2}$	24. egyenlet
--	--------------

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 értékébe, mert nekem így lenne logikus, még ha a szerző külön kezeli ezeket, akkor is. A 4. pontban idézett cikkben ez a korrekció már M^2 tényezőben szerepel. Két dolog miatt azonban ezzel a korrekciókkal nem tudok számolni: az első, hogy nem mondja meg a szerző, hogy hol a határa az erős fókuszálásnak, nyilván nagy lencse előtti nyalábmérőt és kis fókusz távolságú lencsét jelent, azt sejtem, hogy a maximális nyalábtágító állás, és az 50 mm-es fókuszálólencse ide tartozik. A második, hogy sajnos nem tudom a lencse anyagát, így nem tudom, melyik korrekciós faktort válasszam.

4. Harp cikke [35]: „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 szálból lépett ki, és párhuzamosítás után 4,5 mm volt az átmérője. Ötszörös nyalábtágítót használtak a kisebb fókuszfolt elérésére, mely után három különböző fókuszáló lencsét 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 25. egyenlet:

$M^2 = M_0^2 + \frac{a}{f^2}$	25. egyenlet
-------------------------------	--------------

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 [34] IPG gym. YLR-200-SM egymódusú szállézer vizsgál, a kollimált nyalábra megadja a fókuszátlan nyalábátmérőt, az ebből kiszámolt elvi fókuszfoltátmérőt, a Rayleigh-hosszat, és a teljesítménysűrűséget. De a valóságban a fókuszálólencse optikai hibái, elsősorban a szférikus aberráció megnöveli az elvileg elérhető fókuszfolt méretet. A fókuszolt átmérő a fókuszálólencse előtti nyalábátmérő köbével arányosan nő. Az MSZ EN ISO 11146-1:2021 [72] és MSZ EN ISO 11145:2019 [36] szabvány szerinti késél-szkennelő módszerrel mérték a fókuszált nyaláb változóinak értékeit. A kísérleteknél vizsgálták a lézer terjedési irányába eső, a lézer teljesítményétől függő fókuszeltolódást, mely a 89 mikrométeres Rayleigh-hosszat meghaladó 110 mikrométer körüli érték volt. Ezt a fókuszeltolódást a lézert vezető optikai elemek és foglalatjaik felmelegedése okozza. Adatok a számoláshoz: hullámhossz: 1070 nm, $M^2 < 1,1$; fókuszálólencse fókusz távolsága: 50mm, eredeti nyalábátmérő: 6,5mm. [34]. A kísérlet érdekessége, hogy a kétszeres nyalábtágítót egyszer tágítóként alkalmazták, így nagyobb lett a mért fókuszfoltátmérő, mint az elvi érték (16. táblázat 3. sor), aztán kétszeresére szűkítették a nyalábot, így az elvi értékhez képest kisebb fókuszfoltátmérőt kaptak (16. táblázat 1. sor). A szűkítés haszna, hogy nőtt a Rayleigh-hossz: vastagabb anyagot lehet megmunkálni.

<i>Nyalábátmérő mm</i>	3,25	6,5	13
<i>Elvi fókuszolt átmérő mikrométer</i>	23	12	6
<i>Elvi Rayleigh-hossz mikrométer</i>	355	89	22
<i>Mért fókuszolt átmérő mikrométer</i>	20	14	9,4

16. táblázat

Az elvi kiszámolt értékek, és a mérési eredmények összevetése [34]

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

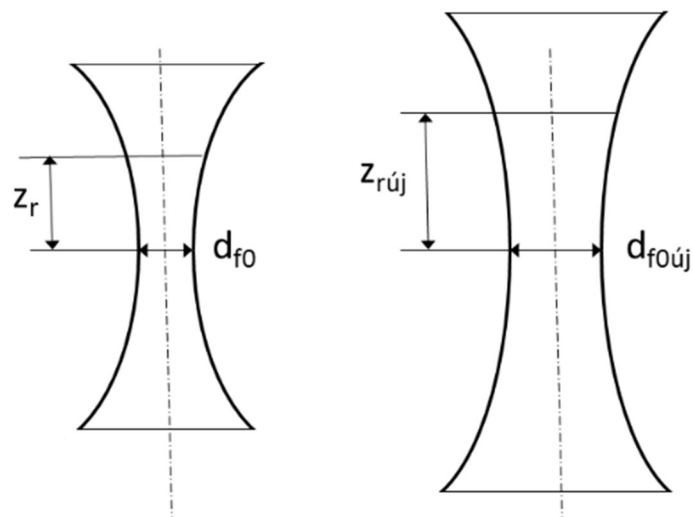
Az M^2 tényező romlásának becslése öt korábbi kísérletnél.

Most egy új módszert mutatunk be, mellyel M^2 tényező romlására egy alsó közelítést lehet adni a megmunkált anyagvastagság és a Rayleigh-hossz összehasonlításával. Az első 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 (17. táblázat) így kiszámolható az M^2 tényező, amely 3,7 és 4,2 közötti értékekre jön ki. Így a fókuszfolt mérete és a Rayleigh-hossz első közelítse kiszámolható. Sajnos 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_a) fele egyenletből (3) képletet átrendezve egy új egyenletet felállítva (10) kiszámoltam az új M^2 tényező becsült értékét, ami 7 körüli értéket adott.

$\frac{\frac{v_a}{2} \pi d_b^2 B_e^2}{4 \lambda f^2} = M_{\text{új}}^2$	<i>26. egyenlet</i>
---	---------------------

A kiszámolt új M^2 tényezővel újra kiszámoltam a fókuszfoltátmérőjét, ami 20 mikrométer körüli volt, amiben az az érdekes, hogy 8-as nyalábtágítónál kb. ekkora volt a vágási rés (17. táblázat). A kapott eredményeket szemlélteti a 33. ábra: a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz nagyobb lett.



33. ábra

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

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-el kisebb, mint 8-as nyalábtágítónál (18. táblázat). Az eredmény egyezik az eddig ismertetett 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.

Összefoglalás

A fejezetben 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 M^2 tényező értéke nő. A megnövekedett M^2 változó alsó határának becslésére bemutatunk egy újösszefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul.

	<i>Első kísérlet [61]</i>	<i>Második kísérlet [73]</i>	<i>Harmadik kísérlet [74]</i>
<i>Anyagvastagság (mm)</i>	<i>0,117</i>	<i>0,12</i>	<i>0,12</i>
<i>Átlagteljesítmény</i>	<i>8...11,2 W</i>	<i>10-12 W</i>	<i>8,7 W</i>
<i>közepes átlagteljesítmény</i>	<i>9,6 W</i>	<i>11 W</i>	<i>8,7 W</i>
<i>M² közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján</i>	<i>3,9</i>	<i>4,2</i>	<i>3,7</i>
<i>d_{f0} (mikrométer)</i>	<i>13,3</i>	<i>14,2</i>	<i>12,7</i>
<i>±z_r (mikrométer)</i>	<i>±33,2</i>	<i>±35,6</i>	<i>±31,7</i>
<i>Az átvágott falvastagság miatt szükséges z_{rúj} (mikrométer)</i>	<i>±58,5</i>	<i>±60</i>	<i>±60</i>
<i>Ebből kiszámolt új M² tényező</i>	<i>6,9</i>	<i>7,1</i>	<i>7,1</i>
<i>Ebből kiszámol új fókuszfoltátmérő (mikrométer)</i>	<i>23,4</i>	<i>24</i>	<i>24</i>

17. táblázat

M² tényező és d_{f0} és z_r elméleti, és az átvágott cső anyagvastagság alapján korrigált új értékei.

	<i>Negyedik kísérlet [75]</i>	<i>Ötödik kísérlet [28]</i>
<i>Anyagvastagság mm</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>
<i>Termékfajta</i>	<i>lemez</i>	<i>lemez</i>
<i>Anyagminőség</i>	<i>AISI 304L</i>	<i>AISI 304L</i>
<i>P átlag</i>	<i>12,5–16,</i>	<i>9,2</i>
<i>Nyalábtágító szorzója</i>	<i>4</i>	<i>4</i>
<i>Átlagteljesítmény</i>	<i>14,25 W</i>	<i>9,2 W</i>
<i>M² közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján</i>	<i>4,85</i>	<i>3,84</i>
<i>d_{f0} mikrométer</i>	<i>32,87</i>	<i>26,02</i>
<i>± Z_r mikrométer</i>	<i>±164,3</i>	<i>±130,12</i>
<i>Az átvágott vastagság miatt szükséges Z_{rúj} (mikrométer)</i>	<i>±200</i>	<i>±200</i>
<i>Ebből kiszámolt új M² tényező</i>	<i>5,9</i>	<i>5,9</i>
<i>Ebből kiszámol új fókuszfoltátmérő (mikrométer)</i>	<i>40</i>	<i>40</i>

18. táblázat

M2 tényező és d_{f0} és z_r elméleti, és az átvágott lemez anyagvastagság alapján korrigált új értékei

4.10 Összegzett következtetések

Új tudományos eredmények

1. Tézis [79]:

A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására kifejlesztettem és elkészítettem egy kísérleti eszközt, amely biztosítja a fólia ferde kifeszítését.

Az általam fejlesztett kísérleti eszközzel meg lehet vizsgálni más lézerberendezéseken is az impulzus üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését, és meg lehet határozni, hogy hol a fókusz: ahol a legkisebb furat van.

3. Tézis [48]:

Kidolgoztam az anyagmegmunkáló szállézerekre a tudományos publikációkban hiányos sugármenetbeli adatok meghatározási módszerét. Az egyes cikkekből különböző mintázat szerint hiányzó tényezők közül a fókuszálólencse fókusz távolsága, a kollimátor fókusz távolsága, a párhuzamosított nyaláb átmérője, a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz kiszámolása is lehetővé válik.

4. Tézis [48]:

Kidolgoztam az impulzusüzemű lézeres vágásra a tudományos publikációkban hiányos technológiai adatok meghatározási módszerét. Így a hiányzó adatok meghatározhatóak lesznek, a kísérleteket meg lehet ismételni más lézerrendszereken is.

5. Tézis [31]

A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletébe be kell építeni azt, hogy a nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot, mert a nyalábtágító előtti d_b nyalábátmérő a nyalábtágítónak köszönhetően B_e -szeresére tágu, így a képletek az alábbiak szerint módosulnak:

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

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

Itt λ a sugárzás hullámhossza, f : a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, M^2 a nyalábminőségi tényező, d_b a fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője.

6. Tézis [31]

Elemeztem a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak a szakirodalomban legelterjedtebb képleteiben szereplő változók hatását, levezettem a nyalábminőséget kifejező változók egymásba való átváltását, és bebizonyítottam, hogy az Nd:YAG lézereknél a gyárilag megadott értékekhez képest a lézernyaláb optikai sugármenetében lévő lencsék hibái miatt a nyalábminőség romlani fog, tehát M^2 nyalábminőség tényező értéke növekedik. A megnövekedett M^2 alsó határának becslésére bemutattam egy újösszefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul:

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

Itt λ a sugárzás hullámhossza, f : a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, M^2 a nyalábminőségi tényező, d_b a fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője, B_e azt adja meg, hogy a nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot, v_a pedig a vágott anyag vastagsága.

7. Tézis

Kidolgoztam a lézeres vágási paraméterek és a sztentek funkcionális biztonságának összefüggésrendszerét. Definiáltam két képletet a munkadarabból eltávolított egységnyi térfogatra jutó energia kiszámítására, egyet a fókuszfolt átmérője és egy másikat a vágási rés keresztmetszetének felső szélessége alapján. Ennek az ad jelentőséget, hogy ha túl nagy az egységnyi térfogatra jutó energia, akkor a megmunkált cső átellenes oldala hőkárosodást szenved.

8. Tézis

Kidolgoztam egy értékelési rendszert a lézeres sztentvágás hibáinak számszerűsítésére. A vágás hiba mértékének/szintjének kiszámításához létrehoztam egy rangsorolási rendszert. A funkcionális biztonság a sztentek gyártásánál értelmezhető, mégpedig a termék (a sztent) elvárt funkcióinak a garantálása oldaláról nézve: minél kisebb a vágási hiba összeg, annál jobban garantálható a sztent biztonsága. A sztentek lézeres vágása során biztonságnak tekintem azt, hogy a lézeres vágás ne veszélyeztesse azokat a termékminőség-követelményeket, amelyek a sztent megfelelő működését (mechanikai és bio- / hemokompatibilitási funkció) biztosítják.

Ajánlások

Véleményem szerint a tudományos munka hasznosulásának egyik fontos aspektusa a hivatkozások: mások hogyan használták fel az általam publikált eredményeket. Közleményeimre 17 független hivatkozást kaptam, ebből 2 külföldön megjelent PhD értekezés [27], [57].

Az általam fejlesztett kísérleti eszközzel meg lehet vizsgálni más lézerberendezéseken is az impulzus üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését, és meg lehet határozni, hogy hol a fókusz: ahol a legkisebb furat van.

Az egyimpulzusos lézeres fóliafúrásoknál egyrészt az a probléma, hogy az összes szilárdtestlézer hátránya, hogy nem adnak egyenletes impulzusokat. Ennek az az oka, hogy nem stacionárius üzemben működnek. A nemlineáris hatások – főleg a plazma- és csóvaképződés, valamint a nyalábenergia-ingadozás, valamint az egyenetlenségek a furatátmérők z koordináta függvényei erős ingadozást mutatnak, ezért érdemes lenne egy pozícióban több impulzust leadni, így a különbségek egy része mérséklődne.

Az anyagmegmunkáló szállézerekre a tudományos publikációkban hiányos sugármenetbeli adatok meghatározása lehetővé teszi a kísérletekben használt lézerek adatainak meghatározását.

Az impulzusüzemű lézeres vágásra kidolgozott, a tudományos publikációkban hiányos technológiai adatok meghatározása lehetővé teszi a kísérletek megismétlését más lézerrendszereken is.

A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletébe beépített B_e -szorzószám lehetővé teszi a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz korrekt meghatározását. Az M^2 nyalábminőség tényező Nd:YAG lézereknél tapasztalt elomlásának becslése lehetővé teszi a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz jobb becslését.

A lézeres vágási paraméterek és a sztentek funkcionális biztonságának összefüggésrendszere logikai kapcsolatot teremt a vágás paraméterei és a sztent biztonság között. Az általam megalkotott két képletet a munkadarabból eltávolított egységnyi térfogatra jutó energia kiszámítására lehetővé teszi, hogy a legkisebb, még vágásra használható energiát használjuk, így a megmunkált cső átellenes oldala ne szenvedjen hőkárosodást.

A sztentvágás hibáinak számszerűsítésére kidolgozott értékelési rendszer számszerűsíti a vágás hibáit. Így biztosítható más kísérleteknél is, hogy a lézeres vágás ne veszélyeztesse azokat a termékminőség-követelményeket, amelyek a sztent megfelelő működését (mechanikai és bio- / hemokompatibilitási funkció) biztosítják.

A kutatási eredményeimet ismertető publikációk jegyzéke

1. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

A nagy pontosságú lézeres vágás technológiai és biztonságtechnikai elemzése In: Wühl, Tibor (szerk.) KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia : Kiadvány kötet Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2024) 124 p. pp. 81-82., 2 p. Absztrakt / Kivonat (Könyvrészlet) | Tudományos[35459830] [Nyilvános] [77]

2. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

Impulzus üzemű lézeres mikromegmunkálás és biztonságtechnikája In: Molnár, György; Wühl, Tibor (szerk.) KVK PhD Workshop Minikonferencia : Absztrakt kötet Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2023) 23 p. pp. 11-11. , 1 p. Absztrakt / Kivonat (Könyvrészlet) | Tudományos[33697828] [Admin láttamozott] [78]

3. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

Szállézeres sugármenetének elemzése a nyalábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (HU) 5 : 2 pp. 72-77. , 6 p. (2022) DOI REAL Egyéb URL Utánközlés (Folyóiratcikk) | Tudományos[33573945] [Nyilvános] [79]

4. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

Analys of Fibre Laser's Optical Construction from the End of the Beam Guiding Optical Fibre to the Focal Spot ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (EN) 5 : 2 pp. 72-77. , 6 p. (2022) DOI Kiadónál REAL Szakcikk (Folyóiratcikk) | Tudományos[33573873] [Admin láttamozott] [48]

5. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (HU) 2 : 2 pp. 115-120. , 6 p. (2019) DOI REAL Egyéb URL Utánközlés (Folyóiratcikk) | Tudományos[31042203] [Nyilvános] [62]

6. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

Role of the Features of Focused Laser Beam at Pulsed Laser Cutting ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (EN) 2 : 2 pp. 115-120. , 6 p. (2019) DOI REAL Egyéb URL Szakcikk (Folyóiratcikk) | Tudományos[31042160] [Nyilvános] [31]

Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

A fókuszhelyzet szerepe erősen reflektáló anyag egyimpulzusos, lézeres fúrásakor

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (HU) 2 : 1 pp. 61-68. , 8 p. (2019) DOI REAL
Egyéb URL Utánközlés (Folyóiratcikk) | Tudományos[30914582] [Nyilvános] [80]

7. Meszlényi, György ; Bitay, Enikő

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

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (EN) 2 : 1 pp. 61-68. , 8 p. (2019) DOI REAL
Teljes dokumentum Szakcikk (Folyóiratcikk) | Tudományos[30793113] [Nyilvános] [81]

8. MESZLÉNYI, GYÖRGY ; BITAY, ENIKŐ

Az egyimpulzusos lézeres fúrás folyamatának elemzése BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI
LAPOK-KOHÁSZAT 151 : 5-6 pp. 40-44. , 5 p. (2018) Szakcikk (Folyóiratcikk) |
Tudományos[30409416] [Admin láttamozott] [79]

9. Bitay, Enikő ; Puskás, Zsolt ; Kulin, Tamás ; Meszlényi, György ; Dobránszky, János

Bioanyagok lézeres vágási technológiája. Laser cutting of advanced biomaterials.

In: Gáti, József (szerk.) 27. Hegesztési Konferencia HEGKONF : PROCEEDINGS Budapest,
Magyarország : Óbudai Egyetem (2014) 450 p. pp. 405-414. , 10 p. REAL
Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos[2591957] [Admin láttamozott] [82]

10. Meszlényi, Gy ; Dobránszky, J ; Puskás, Zs

Role of the laser focus position in the laser beam cutting of thin stainless steel sheets
MATERIALS SCIENCE FORUM 659 pp. 209-214. , 6 p. (2010) DOI Scopus Szakcikk
(Folyóiratcikk) | Tudományos[1452771] [Admin láttamozott] [28]

11. Meszlényi, G ; Izápy, V

Optimization method of laser cutting parameters for high precision stainless steel tubes

In: Galic, Radoslav (szerk.) Proceedings of the SIP 2008, 26th International Conference Science
in Practice Osijek, Horvátország : University of Osijek (2008) pp. 95-97. , 3 p. Teljes
dokumentum Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos[2078421] [Admin
láttamozott] [74]

12. Meszlényi, Gy ; Nagy, P ; Bella, Sz ; Dobránszky, J

Laser beam cutting and welding of coronary stents BID-ISIM WELDING AND MATERIAL TESTING 14 : 2 pp. 17-21. , 10 p. (2008) REAL Egyéb URL Szakcikk (Folyóiratcikk) | Tudományos[2689735] [Admin láttamozott] [73]

13. Meszlényi, Gy ; Dobránszky, J ; Dévényi, L

Laser Cutting of Stainless Steel Thin Sheets with Pulsed Nd:Yag Laser In: Váradi, K; Vörös, G (szerk.) 6. Országos Gépészeti Konferencia - Gépészet 2008 : Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2008) pp. 1-5. , 5 p. REAL Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos[1187188] [Admin láttamozott] [75]

14. Meszlényi, Gy ; Dobránszky, J ; Puskás, Zs

Laser cutting of high precision tubes In: Szabó, P.J.; Réti, T.; Czigány, T. (szerk.) 6th Hungarian Conference on Materials, Science, Testing and Informatics : VI. Országos Anyagtudományi Konferencia Siófok, Magyarország : Trans Tech Publications (2008) pp. 427-431. , 5 p.

DOI REAL WoS Scopus Google scholar Google scholar hash Konferenciaközlemény (Könyvrészlet) | Tudományos[236261] [Egyeztetett] [61]

15. Meszlényi, Gy ; Nagy, P ; Bella, Sz ; Dobránszky, J

Laser beam cutting and welding of coronary stents In: International Conference Innovative Technologies for Joining Advanced Materials : TIMA 2008 Timisoara, Románia (2008) pp. 1-5. , 5 p. REAL Konferenciaközlemény (Egyéb konferenciaközlemény) | Tudományos[1187319] [Admin láttamozott] [73]

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] MSZ EN 60825-1:2015 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 1. rész: Készülékosztályozás és követelmények
- [2] 22/2010. (V. 7.) EüM rendelet a munkavállalókat érő mesterséges optikai sugárzás expozícióra vonatkozó minimális egészségi és biztonsági követelményekről Hatályos: 2023. 01. 01 2010.
- [3] Laser stencil | SMT Stencil | PCB Stencil - PCBGOGO
https://www.pcbgogo.com/knowledge-center/Laser_Stencil.html (letöltve: 2025. 03.03.)
- [4] Laser resistor trimming system | Precision Laser Cutting
<https://laserod.com/capabilities/laser-resistor-trimming/> (letöltve: 2025. 03. 03.).
- [5] F. Ready. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Laser Institute of America; 2001.
- [6] <https://www.potomac-laser.com/services/micro-hole-drilling/> (letöltve: 2025. 03. 03.).
- [7] Buza G. Lézersugaras_technológiák I. Edutus; 2012.
- [8] Hopp B, Al E. 3.1. A lézerfény főbb jellemzői | Lézerek az orvostudományban
[http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lézerek az orvostudományban/31_a_lzerfny_fbb_jellemzi.html](http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lézerek%20az%20orvostudományban/31_a_lzerfny_fbb_jellemzi.html) (letöltve: 2025. 03. 03.).
- [9] MSZ EN ISO 11553-1:2020/A11:2021 Gépek biztonsága. Lézeres megmunkálógépek. 1. rész: Lézerbiztonsági követelmények :pp1-8.
- [10] MSZ EN 60825-4:2006/A2:2011 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 4. rész: Lézervédelmek
- [11] IEC TR 60825-14: 2004. Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírása. 14. rész: Felhasználói útmutató
- [12] MSZ EN ISO 11252:2013 Lézerek és lézerberendezések. Lézerkészülékek. A dokumentáció minimumkövetelményei
- [13] MSZ EN 12254:2010 Lézermunkahelyek védőernyői. Biztonsági követelmények és vizsgálat
- [14] MSZ EN ISO 19818-1:2021 Szem- és arcvédelem. Lézersugárzás elleni védelem. 1. rész: Követelmények és vizsgálati módszerek :9–11.
- [15] MSZ EN 207:2017 Személyi szemvédő eszközök. Szűrők és szemvédők lézersugárzás ellen
- [16] MSZ EN 208:2010 Személyi szemvédő eszközök. Szemvédők lézerek és lézerrendszerek beállítási munkáihoz (lézerbeállítási szemvédők)
- [17] MSZ EN 61508-1:2010 Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága. 1. rész: Általános követelmények
- [18] MSZ EN IEC 62061:2021 Gépek biztonsága. A biztonsággal összefüggő vezérlőrendszerek működési biztonsága

- [19] MSZ EN ISO 13849-1:2016 Gépek biztonsága. Vezérlőrendszerek biztonsággal összefüggő részei. 1. rész: A tervezés általános alapelvei
- [20] MSZ ISO 31000:2018 Kockázatmenedzsment. Irányelvek
- [21] MSZ EN ISO 12100:2011 Gépek biztonsága. A kialakítás általános elvei. Kockázatfelmérés és kockázatsökkentés
- [22] (89/391/EGK) a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítását ösztönző intézkedések bevezetéséről
- [23] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2006/25/EK IRÁNYELVE (2006. április 5.) a munkavállalók fizikai tényezők hatásának való expozíciójára (mesterséges optikai sugárzás) vonatkozó egészségügyi és biztonsági minimumkövetelményekről
- [24] Nem kötelező érvényű útmutató a 2006/25/EK irányelv végrehajtása során alkalmazható legjobb gyakorlatokhoz (Mesterséges optikai sugárzás)
- [25] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2016/425 RENDELETE (2016. március 9.) az egyéni védőeszközökről és a 89/686/EGK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről
- [26] Thawari G, Sundar JKS, Sundararajan G, Joshi S V. Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2005;170:229–39.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.021>.
- [27] Muhammad NB. Laser Micromachining of Coronary Stents for Medical Applications. The University of Manchester, PhD thesis, 2012.
https://doi.org/https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54523284/FULL_TEXT.PDF.
- [28] Meszlényi G, Dobránszky J, Puskás Z. Role of the laser focus position in the laser beam cutting of thin stainless steel sheets. *Materials Science Forum*, vol. 659, Trans Tech Publications Ltd; 2010, p. 209–14.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.659.209>.
- [29] Gökhan Demir A, Previtali B. Comparative study of CW, nanosecond- and femtosecond-pulsed laser microcutting of AZ31 magnesium alloy stents. *Biointerphases* 2014;9. <https://doi.org/10.1116/1.4866589>.
- [30] Catalano G, Demir AG, Furlan V, Previtali B. Use of Sheet Material for Rapid Prototyping of Cardiovascular Stents. *Procedia Engineering*, vol. 183, Elsevier Ltd; 2017, p. 194–9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.019>.
- [31] Meszlényi G, Bitay E. Role of the Features of Focused Laser Beam at Pulsed Laser Cutting. *Acta Materialia Transylvanica* 2019;2:pp 115-120.
<https://doi.org/10.33924/amt-2019-02-09>.
- [32] Kaplan AF. Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting. Shaker Verlag Aachen; 2002.
- [33] Paripás B, Szabó S, Kocsisné Baán M, Tolvaj B, Bencs B. Lézeres mérési- és megmunkálási eljárások a gépészetben. Nemzeti Ta. 2009.
- [34] Zimmermann N, Mys I, Schmidt M. Laser assisted net shape engineering 5 Pro-

- ceedings of the LANE 2007. Micro cutting of thin sheets with single mode fiber lasers, 2007, p. 220–4.
- [35] Harp WR, Paleocrassas AG, Tu JF. A Practical method for determining the beam profile near the focal spot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2008;37:1113–9. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>.
 - [36] MSZ EN ISO 11145:2019 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések. Szakszótár és jelképek
 - [37] Wirth P. Introduction to Industrial Laser Materials Processing. Hamburg, Germany, Rofin-Sinar Laser, 2000. 14–59. 2000:14–59.
 - [38] Hemmerich M, Thiel M, Lupp C, Hanebuth F, Weber H, Graf T. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, *Physics Procedia* 56 (2014). Reduction of Focal Shift Effects in Industrial Laser Beam Welding by Means of Innovative Protection Glass Concept, Elsevier B.V.; 2014, p. 681–8. <https://doi.org/doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.161>.
 - [39] Rodrigues C, Vanhove H, Duflou J. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, *Physics Procedia* 56. Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional fiber and CO₂ technologies, Elsevier B.V.; 2014, p. 901–8. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>.
 - [40] U T, T H, S S. 2 nd International Conference on Ramp-Up Management 2014 (ICRM), *Procedia CIRP* 20. Setup and Maintenance of Manufacturing Quality in CO₂ Laser Cutting, 2014, p. 98–102.
 - [41] S H, S S, A K. In situ measurement of laser beam quality. *Applied Physics B* (2017) 123:233 2017:233–4. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6811-y>.
 - [42] Formulary <https://www.silloptics.de/en/service/sill-technical-guide/laser-optics/formelsammlung>(letöltve: 2025. 03. 03.).
 - [43] Marco Mendes. Fiber laser micromachining in high-volume manufacturing. *Industrial Laser Solutions* 2015;1. <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216389/fiber-laser-micromachining-in-high-volume-manufacturing> (letöltve: 2025. 03. 03.)
 - [44] Chen CS, Lin SY, Chou NK, Chen YS, Ma SF. Optimization of laser processing in the fabrication of stents. *Materials Transactions* 2012;53:2023–7. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012188>.
 - [45] Demir AG, Previtali B, Biffi CA. Fibre laser cutting and chemical etching of AZ31 for manufacturing biodegradable stents. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/692635>.
 - [46] García López E, Alexis MT, Juansethi IM, Siller Héctor R, Alex EZ, Ciro AR. Fiber Laser Microcutting of AISI 316L Stainless Steel Tubes- influence of Pulse Energy and Spot Overlap on Back Wall Dross. *Procedia CIRP* 2016;49:222–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.11.020>.

- [47] Guerra AJ, Ciurana J. Minimum Quantity Lubrication in Fibre Laser Processing for Permanent Stents Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 2019;41:492–9. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.036>.
- [48] Meszlényi G, Bitay E. Analysis of Fibre Laser ' s Optical Construction from the End of the Beam Guiding Optical Fibre to the Focal Spot. *Acta Materialia Transylvanica* 2022;5:72–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.33924/amt-2022-02-05>.
- [49] J. Dobránszky. Anyagismereti és technológiaismereti alapok, Budapest: DyTh Bt.; 2023, p. 227–32.
- [50] Major L. Endoluminális tágitóbetét enlarging facing for blood-vessels. Hungarian Patent, P9602099, 1996.,
- [51] László Major. Medstent: Tágitható érfaltámasztó gyűrű EXPANDIBLE STENT. Hungarian Patent, P9900429, 1996, 1996.
- [52] Polanec B, Kramberger J, Glodež S. A review of production technologies and materials for manufacturing of cardiovascular stents. *Advances in Production Engineering & Management* 2020;Volume 15:390–402. <https://doi.org/10.14743/APEM2020.4.373>.
- [53] MSZ EN ISO 25539-1:2017 Szív- és érrendszerei implantátumok. Endovaszkuláris eszközök. 1. rész: Endovaszkuláris protézisek
- [54] MSZ EN ISO 7198:2017 Szív- és érrendszerei implantátumok és extrakorporális rendszerek. Érprotézisek. Cső alakú érgraftok és érrendszerei foltanyagok (ISO 7198:2016)
- [55] Kathuria YP. Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy. *Journal of Materials Processing Technology* 2005;170:545–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.041>.
- [56] Nagy P, Dobránszky J. Laser cutting of small diameter nitinol tube. *Materials Science Forum*, vol. 729, Trans Tech Publications Ltd; 2013, p. 460–3. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.460>.
- [57] Kleine KF, Whitney B, Wstkindt KG, Watkins KG. Use of fiber lasers for micro cutting applications in the medical device industry. *ICALEO 2002 - 21st International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings* 2002;2002. <https://doi.org/10.2351/1.5065757>.
- [58] Meng H, Liao J, Zhou Y, Zhang Q. Laser micro-processing of cardiovascular stent with fiber laser cutting system. *Optics and Laser Technology* 2009;41:300–2. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.06.001>.
- [59] Muhammad N, Whitehead D, Boor A, Li L. Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316L stainless steel tubes for medical device applications. *Journal of Materials Processing Technology* 2010;210:2261–7. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.015>.
- [60] Chen CS, Lin SY, Chou NK. Optimization technology and developing of vascular stents. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 284–287, 2013, p. 390–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.390>.

- [61] Meszlényi G, Dobránszky J, Puskás Z. Laser cutting of high precision tubes. *Materials Science Forum* 2008;589:427–31.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.589.427>.
- [62] György M, Enikő B. A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál. *Műszaki Tudományos Közlemények* Xx 2019.
<https://doi.org/10.2478/mtk-2019-xxxx>.
- [63] Puskás, Zs. Antalfi, Z. Dobránszky, J. OGÉT Budapest, 2009. XVII. Országos Gépész találkozó <https://real.mtak.hu/11192/1/1230234.pdf> (letöltve: 2025. 03. 03.)
- [64] Halmai A. *Finommechanikai szerkezetek*. Edutus Főiskola; 2012.
- [65] Low DKY, Al: E. Characteristics of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118 2001:179–186.
- [66] MSZ EN ISO 17658:2015 Hegesztés. Lángvágott, lézersugárral vágott, és plazmával vágott felületek eltérései. Terminológia
- [67] Kreisz I. *Lézersugár-vezetés*. Edutus Főiskola; 2011.
- [68] Duley, D. *Laser welding*, 1. edition. Wiley-Interscience; 1998.
- [69] Meszlényi G, Bitay E. Az egyimpulzusos lézersugaras fűrés folyamatának elemzése. *Országos Magyar Bányászati És Kohászati Egyesület Lapja* 2018;2018/5-6:pp 40-44
- [70] Naeem M. Laser Processing of Reflective Materials. *Laser Technik Journal* 2013;10:18–20. <https://doi.org/10.1002/latj.201390001>.
- [71] Stephen A, Ocana R, Esmoris J, Thomy C, Soriano C, Vollertsen F, et al. Laser micro drilling methods for perforation of aircraft suction surfaces. *Procedia CIRP*, vol. 74, Elsevier B.V.; 2018, p. 403–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.157>.
- [72] MSZ EN ISO 11146-1:2021 Lézerek és lézerberendezések. A lézernyalábméretek, a széttartási szög és a nyalábterjedési tényező vizsgálati módszerei. 1. rész: Sztigmatikus és egyszerű asztigmatikus nyalábok
- [73] Meszlényi G, Nagy P, Bella S, Dobránszky J. Laser beam cutting and welding of coronary stents 2008:12–3. *International Conference Innovative technologies for joining advanced materials Timișoara, Romania, 12-13.06.2008*
- [74] Meszlényi G, Izápy V. Science in practice 2008. In: Galić R, editor. *Optimization Method of Laser Cutting Parameters for High Precision Stainless Steel Tubes*, Osijek, Croatia: Faculty of Electrical Engineering J.J. Strossmayer Univ. of Osijek; 2008, p. 95–8.
- [75] Meszlényi G, Dobránszky J, Dévényi L. Laser cutting of stainless steel thin sheets with pulsed Nd:YAG laser. *Gépészet* 2008, Budapest: , p. 29–30.
- [76] Meszlényi G, Bitay E. Az egyimpulzusos lézersugaras fűrés folyamatának elemzése. *Országos Magyar Bányászati És Kohászati Egyesület Lapja* 2018;2018/5-6:pp 40-44.

- [77] Gy. Meszlényi EB, Meszlényi G, Bitay E. A nagy pontosságú lézeres vágás technológiai és biztonságtechnikai elemzése. In: Wühl T, editor. KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar; 2024, p. 81–2.
- [78] G.Meszlényi EB. Impulzus üzemű lézersugaras mikromegmunkálás és biztonságtechnikája. In: Molnár GWT, editor. KVK PhD Workshop Minikonferencia, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar; 2023, p. 11–11.
- [79] Meszlényi G, Bitay E. Szállézeres sugármenetének elemzése a nyalábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig. *Acta Materialia Transylvanica Magyar Kiadás* 2022;5:72–7. <https://doi.org/10.33923/amt-2022-02-05>.
- [80] Meszlényi G, Bitay E. A fókuszhelyzet szerepe erősen reflektáló anyag egyimpulzusos, lézersugaras fúrásakor. *Acta Materialia Transylvanica Magyar Kiadás* 2019;2:61–8. <https://doi.org/10.33923/amt-2019-01-10>.
- [81] Meszlényi G, Bitay E. The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials. *Acta Materialia Transylvanica* 2019;2:61–8. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-10>.
- [82] Bitay E, Puskás Z, Kulin T, Meszlényi G. Bioanyagok lézersugaras vágási technológiája. 27. Hegesztési Konferencia, Budapest: 2014, p. 405–14.
- [83] Nagy P. Fém bioanyagok és implantátumok mikromegmunkálása PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014.

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Jelölés	Megnevezés	A precíziós megmunkálás szakirodalmában használatos mértékegység
a_v	anyagvastagság	μm
B_e	a nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot	
D	fókuszáló lencse előtti lézernyaláb átmérő	mm
d_b	a párhuzamosított nyaláb átmérője	mm
D_{BT}	impulzusok közti távolság	μm
d_{f0}	fókuszfolt átmérő	μm
d_{fc}	a nyalábvezető optikai szál magátmérője	μm
d_n	fúvókaátmérő	mm
E_i	impulzusenergia	mJ
E_{v1}	egységnyi térfogatra jutó energia a fókuszfoltátmérő alapján	J/mm^3
E_{v2}	egységnyi térfogatra jutó energia a vágási rés szélesség alapján	J/mm^3
f	a fókuszálólencse fókusztávolsága	mm
f_{coll}	a kollimátor lencse fókusztávolsága	mm
f_i	impulzus frekvencia	Hz
I	besugárzott felületi teljesítmény	W/cm^2
k_1	vágási rés szélesség felül	μm
k_2	vágási rés szélesség alul	μm
λ	lézer hullámhossz	nm vagy μm
M^2	nyalábterjedési tényező M^2	
p	segédgáz nyomás	bar
P_{av}	átlagteljesítmény	W
P_i	impulzusteljesítmény	W
s, a_v	anyagvastagság	μm
PO	vágási foltátfedés	%
s_v	vágási rés szélesség	μm
θ_s, θ	a fókuszált nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge	milliradián
t_i	impulzusidő	ms
v	vágási sebesség	mm/s
z	anyalábterjedés irányába mutató koordináta	mm
z_0	a fókusz sík z-koordinátája	mm
Z_r	Rayleigh-hossz	μm

19. táblázat

Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései

Jelölés	Magyar leírás
304	az 1.4301 korrózióálló ausztenites acél AISI szabvány szerinti típusjele [83]
316L	az X2CrNiMo-17-12-2 (1.4404) korrózióálló ausztenites acél AISI szabvány szerinti típusjele (L: low carbon – kis karbontartalmú) [83]
316LVM	az X2CrNiMo-18-14-3 (1.4441) korrózióálló ausztenites acél AISI szabvány szerinti típusjele (L: low carbon – kis karbontartalmú; VM: vacuum melted - vákuumos átolvasztással előállított) [83]
BME ATT	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszék
EKG	Elektrokardiográf
HAZ	hőhatásövezet (heat-affected zone) [83]
SEM	Scanning Electron Microscope (pásztázó elektronmikroszkóp)
TEM	Tranzverzális Elektromágneses Módus

20. táblázat Rövidítések jegyzéke

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat Az értekezésben kiszámolt vagy mért mennyiségek pontossága.....	25
2. táblázat A sztentgyártó szálllézerekben előállított lézernyalábok jellemzői	26
3. táblázat A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai.....	27
4. táblázat A sztent vágó és az általános mikromegmunkáló lézerek adatainak összehasonlítása	28
5. táblázat A két lézer paramétereinek összehasonlítása.....	34
6. táblázat Nd:YAG lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel vannak szedve	38
7. táblázat A saját vágási sebességet variáló kísérlet, az újonnan kiszámolt adatok dőlt és kövér karakterrel vannak szedve	40
8. táblázat Szálllézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel vannak szedve	42
9. táblázat A sztentgyártó ultrarövid impulzus idejű lézernyalábok jellemzői	44
10. táblázat Ultrarövid impulzus idejű lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és kövér karakterrel szedve.....	45
11. táblázat Sztent vágási hibák értékelési rendszere.....	49
12. táblázat Példa vágási minőség értékelésére.....	50
13. táblázat Anyagok Abszorpció (A) és Reflexió (R%) adatai a lézer hullámhosszához közeli 1064 nanométeres hullámhosszon.....	61
14. táblázat Rézfólia fúrási kísérleténél soronként egy furatsorozathoz tartozó impulzusadatok	66
15. táblázat Az elvi kiszámolt értékek, és a mérési eredmények összevetése [33].....	70
16. táblázat M^2 tényező és d_{f0} és z_r elméleti, és az átvágott cső anyagvastagság alapján korrigált új értékei.	73
17. táblázat $M2$ tényező és d_{f0} és z_r elméleti, és az átvágott lemez anyagvastagság alapján korrigált új értékei.	73
18. táblázat Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései.....	87
19. táblázat Rövidítések jegyzéke	88
20. táblázat Az értekezésben használt szakkifejezések angol megfelelői a-tól m-ig	93
21. táblázat Az értekezésben használt szakkifejezések angol megfelelői n-től z-ig	94

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A vágásifolt-átfedés szemléltetése	15
2. ábra Vágásifolt-átfedés szemléltetése	16
3. ábra A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése.....	21
4. ábra A fókuszált lézernyaláb jellemzői	23
5. ábra A fókuszált nyaláb hosszmetseti vázlata cső vágásakor.....	24
6. ábra Sztentes értágítás [49]	29
7. ábra Koszorúér tágító sztent (Minvasive Kft. Budapest, Magyarország)	30
8. ábra A Corina vágórendszer	32
9. ábra 1500 Hz-es lézerbeállítással készített vágások a cső külső palástján SEM kép. A vágási sebesség az ábra tetején lévő vágástól az alsó irányában nő 2,5 – 40 mm/s között.....	41
10. ábra 1500 Hz-es lézerbeállítással készített vágások a cső belső palástján SEM kép. A vágási sebesség az ábra alján lévő vágástól a felső irányában nő 2,5 – 40 mm/s között	41
11. ábra A vágási rés keresztmetszete 1,200 mm átmérőjű, 0,120 mm falvastagságú, AISI 304L anyagú rozsdamentes acél cső vágásakor	47
12. ábra Tapadósalak a cső belső falán $D = 1,200$ mm, $v = 0,120$ mm, anyag: AISI 304L acél. A vágást a Corina sztentvágó lézerberendezéssel végeztem.....	47
13. ábra Sztentek lézeres vágási paramétereinek összefüggései	48
14. ábra Termikus elszíneződés (hőkárosodás) a cső lézeres vágással átellenes külső falán 1 – Erős hőkárosodás, 2 – Gyenge hőkárosodás, 3 – Másik vágási vonalak	49
15. ábra A fóliafeszítő szerkezet modellje	52
16. ábra A fóliafeszítő szerkezet a lézerfej alá, a mozgatórendszerre szerelve.....	52
17. ábra A fókuszált lézernyaláb különböző vízszintes síkjaiban különböző méretű furatok jönnek létre.....	54
18. ábra A második kísérletsorozatban, 2 bar nyomású N_2 segédgázzal készített furatsorozatok	54
19. ábra 30 mJ impulzusenergiával készített furatsor közepe: nagy hőhatásövezet a furatok körül	55
20. ábra 30 mJ impulzusenergiával készített furatsor vége: szabálytalan felső kontúrú furatok	55
21. ábra 5 bar nyomású nitrogén gázzal, 30 mJ energiával készített furatok felső lemezsíkon mért átmérője a Z koordináta függvényében.....	57
22. ábra A 30 mJ és a 10 mJ impulzusenergiával készített furatsor eleje	58

23. ábra 2 bar nyomású N ₂ gázzal, 30 mJ impulzusenergiával készített furatok felső lemezsíkon mért átmérője a Z koordináta függvényében	59
24. ábra A mérőhasábbal állítható fóliafeszítő a lézerfej alatt.	62
25. ábra A fóliafeszítő közelebbről	62
26. ábra Rézfólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban.....	64
27. ábra Az olvasztási határenergia és a fókuszált nyaláb kölcsönhatása	64
28. ábra Rézminta 213 mJ impulzusenergiával létrehozott furatainak Z koordinátafüggvénye és annak régiói; Z=0 a lézerfejhez közelebbi koordináta	65
29. ábra A szétterülő nyaláb miatt itt nem jött létre furat.....	65
30. ábra Egy, a fűvókához közeli furat képe	65
31. ábra Egy, a fűvókához közeli furat képe, itt látszik a tapadósalak. 301,9 mikrométer a távolság a szomszéd furattól, 63,97 mikrométer a hárompontos furatátmérő-mérés eredménye	66
32. ábra Egy, a fűvókától távolabbi furat	66
33. ábra A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz elméleti, és becsült M^2 tényező alapján kiszámolt értékeinek szemléltetése	72

FÜGGELÉK

FÚRÁSI ADATLAP

Lézersugaras Fúrás adatlap YLR-150/1500 QCV szállézerhez

Kísérletet végzi: Meszlényi György Dátum: 2019. február 13.

Helyszín: Pulzor Művek, Rétság, Pusztaszántói út 10.

Cél: Furatsorozat-fókuszpozíció kísérlet

Teljesítményszint %:	70	70	100	100	100	100	100	b
Impulzus frekvencia Hz:	100	40	40	40	40	40	40	b
Impulzusidő ms KÍSÉRLETI VÁLT.:	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	b
Impulzusenergia mJ=W*ms (számít):	-	90	148	317	475	636	792	sz
Impulzus teljesítmény W:	-	900	1481	1583	1584	1589	1583	k
lézer átlagteljesítm mW=mJxHz (szám)	-	4	6	13	19	25	32	sz
Vágás sikeres (I/N)?	N	N	I	I	I	I	I	I
Fókuszállás a fejen mm:	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	b
Kísér. eszk. mérőhasáb magasság mm:	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	b
Fúrás vonal sorszáma:	1	2	3	4	5	6	7	
Beállítás ugyanaz, mint mellette?								
Legkisebb furat átmérő mikrométer								

Utolsó oszlop: b: beállított, sz: számított, k: kijelzett érték

Vágási sebesség: 20 mm/s

Mozgatórendszer gyorsulása: 10 mm/s²

Segédgáz: N₂ nyomás: 5 bar

Nyalábtágító állás: 1

Fúvóka távolsága az anyagtól: változó

A fólia szöge 17,50 mm mérőhasáb alátámasztásnál: 8,11 fok

Két szomszédos furat középpont távolsága az anyagon 40 Hz frekvenciánál: 505 mikrométer

Két szomszédos furat középpontjának z-irányú távolsága (lézer terjedési iránya): 71 mikrométe

A fenti érték 40 Hz frekvenciánál és 17,50 mm mérőhasáb alátámasztásnál érvényes

Az anyag: ezüst fólia

Vastagsága: 200 mikrométer

A fúrás vonal alakja: 16 mm egyenes

Azonosító jelzései: 1-es számú fólia; + Z irányt a lézerfej felé bekarcolt nyíl jelez

Környezeti hőmérséklet: 24,6 Celsius lézer kijelzőjén

Páratartalom: 24,6 % RH

Plazmaképződés megfigyelhető-e? NEM

4.11 A szakirodalomban használt angol szakkifejezések magyar megfelelői

Az alábbi szakkifejezéseket az MSZ EN ISO 11145:2019 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések szabványból vettem. [36] ld. 21. táblázat és 22. táblázat

átlagteljesítmény: average power
felületegységre jutó impulzusenergia: pulse energy per unit surface area
fókuszálhatóság: focus ability
fókuszáló lencse: focusing lens
fókuszált nyaláb = focused laser beam
fókuszált nyalábkeresztmetszet: cross section of the focused beam
fókuszfoltátmérő = focal spot diameter
fókuszmélység = depth of focus
fókusz sík: focal plane
fókusz távolság: focal length
Galilei-távcső: Galilei telescope
gyárilag megadott: factory given
hőhatásövezet: heat affected zone
hullámhossz: wavelength
ideális Gauss-nyaláb: ideal Gauss-beam
ideális Gauss-nyaláb diffrakciós határa: diffraction limit of an ideal Gauss beam
impulzusos üzemi lézer: pulsed laser
K nyalábterjedési tényező: K beam propagation factor
késél szkennelő: knife edge scanning
kollimált: collimated
kristályrúd: crystal rod
lézersugaras megmunkálás: laser processing
lézervágás: laser cut
M ² nyalábminőség tényező: M ² beam propagation ratio
M ² tényező = M ² factor
mátrixérzékelős detektor: matrix sensor
megmunkáló-lézer = machining laser
mikro megmunkálás: micromachining
módus szerkezet: modus structure

21. táblázat

Az értekezésben használt szakkifejezések angol megfelelői a-tól m-ig

nagy érzékenység: high sensibility
nem folyamatos lézerműködés: non-continuous laser operation
nyalábátmérő: beam diameter
nyalábderek sugár: beam waist radius
nyalábgyengítés: beam attenuation
nyalábminőség romlás: degradation of beam quality
nyalábminőséget kifejező változók = beam quality numbers
nyalábparaméter szorzat: beam parameter product
nyalábtágító faktor: beam expander factor
nyalábterjedés irányába mutató z-koordináta: z-coordinate towards the beam spreading direction
Rayleigh-hossz = Rayleigh length
rés szkennelő: slit scanning
rezonátor: resonator
salak: dross
sugártengely: beam axis
tágítatlan: unexpanded
táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge: angle of the asymptote cone covering the expanding beam
távoli mező divergencia szög: far field divergence angle
termikus lencsézés: thermal lensing
torzít: distort
utómegmunkálás: post processing
vágási minőség: cut quality
vágási rés: kerf
változó görbület: changing curvature
zoomos 8-fokozatú nyalábtágító: zoom 8-step beam expander

22. táblázat

Az értekezésben használt szakkifejezések angol megfelelői n-től z-ig

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A doktori kutatás 18 éve alatt sok értékes embert ismertem meg, sok értékes tanácsot kaptam.

Elsőként témavezetőmnek, Bitay Enikőnek szeretném megköszönni a kutatómunka során kapott szakmai tanácsokat, és bátorítást.

Hálával tartozom Dobrászky Jánosnak, akinél kezdtem a kutatást: a témavezetést a BME-n, szakmai konzultációkat, cikkek, prezentációk lektorálását, és hogy a mai napig türelmesen segíti munkámat. A BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársainak köszönöm a SEM mikroszkóp kezelésében és a csiszolatok készítésében nyújtott értékes segítséget.

Köszönöm Buza Gábornak a konzultációkat a lézersugaras megmunkálás témában.

Köszönöm Hopp Bélának a konzultációkat a lézerfizika területén.

Köszönöm Hronyecz Erikának és Lévay Katalinnak a doktori adminisztrációban való sokrétű segítséget.

Köszönöm Kovács Tündének a szakmai tanácsokat a komplex vizsgálóra való készüléskben.

Köszönöm Lendvay Mariannának a hasznos tanácsok a hivatalos ügyek intézésében, és szakmai kérdésekben.

Köszönöm Nagy Lajos kollégámnak a szinuszméchanizmus elvén működő kísérleti eszköz precíz elkészítését, melyben tetten érhető a finommechanikai megmunkálások terén szerzett sok évtizedes tapasztalat.

Köszönöm Oláh Juliannának a Mendeley hivatkozáskezelő megismertetését és a dokumentumszerkesztési tanácsokat.

Köszönöm Puskás Zsoltnak a lézerberendezések kezelésében nyújtott segítségét.

Köszönöm Rajnai Zoltánnak és Goda Tibornak, hogy pozitívan bírálták el a Biztonságtudományi Doktori Iskolához benyújtott kérvényeimet.

Köszönöm Rácz Ervinnek a konzultációkat a lézerfizika területén.

Köszönöm Szabó Gyulának a konzultációkat a biztonságstudomány kérdéseiben.

Köszönöm Tompos Péter kollégámnak, hogy biztosította a munkámhoz a számítástechnikai háttérét.

Végül köszönöm feleségemnek, Szilviának, és gyerekeimnek, hogy biztos háttérrel nyújtottak a munka során.