



MESZLÉNYI GYÖRGY JÓZSEF

A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás technológiai és biztonságtechnikai elemzése

Témavezető: Prof. Dr. habil. Bitay Enikő Magdolna

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Réger Mihály, DSc.

Titkár:

Dr. Fábián Enikő Réka

Tagok:

Dr. Mankovits Tamás

Dr. Bagyinszki Gyula

Dr. Kuzsella László

Bírálok:

Prof. Dr. habil. Kovács Tünde Anna

Prof. Dr. Dr.h.c. Buza Gábor

Nyilvános védés időpontja:

2026.

D12) Nyilatkozat a munka önállóságáról, irodalmi források megfelelő módon történt idézéséről

NYILATKOZAT

A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK

MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott, Meszlényi György József kijelentem, hogy „A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás technológiai és biztonságtechnikai elemzése” című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2025. 08. 27.

Meszlényi György József

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	7
A tudományos probléma megfogalmazása, célkitűzések.....	8
Kutatási módszerek	9
1 A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE	11
1.1 A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás alkalmazásai	11
1.2 A lézersugárzás keltése	12
1.3 A lézersugárzás jellemzői.....	12
1.4 A lézeres vágás biztonságtechnikai elemei, a lézeres gyártás biztonságának szabályozása	14
1.4.1 Nemzetközi szabványok:.....	14
1.4.2 Európai Unió irányelvek.....	15
1.4.3 Jogszabályok	16
2 A NYALÁBMINŐSÉGI TÉNYEZŐ ÉS A FÓKUSZÁLT LÉZERNYALÁB JELLEMZŐI	17
2.1 A nyalábminőség mérőszámai	17
2.2 A fókuszfoltátmérő képletének származtatása	18
2.3 A Rayleigh-hossz képletének származtatása.....	19
2.4 A nyalábtágító hatásának figyelembevétele a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletében.....	20
2.5 A fókuszált lézernyaláb burkológörbéjének származtatása	21
3 A SZÁLLÉZEREK NYALÁBJELLEMZŐ ADATAI A NYALÁBVEZETŐ SZÁL VÉGÉTŐL A FÓKUSZFOLTIG.....	22
4 A NAGY PONTOSSÁGÚ LÉZERES VÁGÁS TERÜLETE ÉS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI.....	28
4.1 A fókuszfoltátfedés definíciója és képlete	29
4.2 Az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia kiszámítása axiális lézeres vágás esetén.....	32
5 SZTENTEK ÉS AZOK LÉZERES VÁGÁSA	34

6	A LÉZERES FÚRÁS SZAKIRODALMA	36
7	A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE	40
7.1	A kísérletekhez használt Corina lézerrendszer ismertetése.....	40
7.2	A kísérletekhez használt szállézer rendszer ismertetése	41
7.3	A felhasznált anyagok: ausztenites acél, réz, ezüst tulajdonságainak jellemzése....	43
7.3.1	Az optikai tulajdonságok összehasonlítása	43
7.3.2	A felhasznált anyagok fizikai és kémiai tulajdonságai	44
7.3.3	A kísérletekhez használt ausztenites acél jellemzése	46
7.4	A kísérletek kiértékeléséhez használt mikroszkópok és képelemző programok.....	47
8	SZTENTGYÁRTÁSI CSÖVEK VÁGÁSI KÍSÉRLETEI SZAKIRODALMI ELEMZÉssel	48
8.1	A szakirodalomban található Nd:YAG lézeres sztentvágás adatainak elemzése.....	48
8.2	A szakirodalomban található szállézeres sztentvágás adatainak elemzése	50
8.3	Az ultrarövid: ps-os és fs-os impulzusidőt használó lézerekről szóló cikkek elemzése	52
9	AZ ND:YAG LÉZERES SZTENTGYÁRTÁSI CSÖVEKEN VÉGZETT VÁGÁSI KÍSÉRLETEK ADATAINAK ELEMZÉSE	55
7	A VÁGÁSI MINŐSÉG ÉRTÉKELÉSE ÉS TERMÉKBIZTONSÁG A LÉZERES VÁGÁSSAL VÉGZETT SZTENTGYÁRTÁSNÁL.....	57
8	AZ EGYIMPULZUSOS LÉZERES FÚRÁS FOLYAMA-TÁNAK ELEMZÉSE FÉMFÓLIÁK FÚRÁSÁNÁL	63
8.1	Kísérleti munka ausztenites acél fólia fűrésével	63
8.2	A kísérleti munka rézfólia fűrésével	72
8.3	A kísérleti munka ezüsfólia fűrésével	78
8.4	A fóliafűrés eredményeinek összehasonlítása.....	81
	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	82
	Új tudományos eredmények.....	84
	Ajánlások.....	86

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	88
EGYÉB, A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	89
IRODALOMJEGYZÉK.....	90
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	97
TÁBLÁZATJEGYZÉK	98
ÁBRAJEGYZÉK	100
FÜGGELÉK.....	102
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	106

BEVEZETÉS

2007-ben 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 kapcsolódnak ezek a biztonság tudomány területéhez, hiszen a kutatómunkát 2020 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 orvostechonikai eszköz, mely ezt a biztonságot szolgálja, de önmagában nem elég, életmódváltásra, hosszú távú kardiológiai utógondozásra is szükség van.

Az első kutatási időszakomat követő években rozsdamentes acél, réz és ezüst anyagú fóliák egyimpulzusos lézeres fűrésének folyamatait elemeztem, és a lézerek nyalábjellemzői hiányzó adatainak, technológiai változóinak 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 szinte mind a legveszélyesebb 4. lézerveszélyességi 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 rendelet, ezek közül a legfontosabb egy Egészségügyi Minisztériumi rendelet [2].

A tudományos probléma megfogalmazása, célkitűzések

- A lézersugaras megmunkálásra vonatkozó, annak biztonságát érintő szabványok, direktívák, rendeletek felsorolása, ez a terület annyira kidolgozott, hogy nehéz lenne itt új tézist létrehozni.
- A fókuszált lézernyaláb két legfontosabb jellemzőjének képletét szeretném elemezni, ezek a fókuszolt átmérő és a Rayleigh-hossz. A szakirodalomban szereplő képletek nem tartalmazzák a sokszor jelen lévő nyalábtágító hatását, melyet a rezonátor és a fókuszálólencse közé építenek be. A nyalábtágító szerepét leíró paramétert szeretnék beépíteni ezekbe a képletekbe.
- Az anyagmegmunkáló szállézerekre a tudományos publikációkban sokszor hiányosan közölnek adatokat. A nyalábvezető száltól a fókuszfoltig terjedő adatok meghatározási módszerét szeretném kidolgozni a szakirodalomban különböző helyen lévő képletek egyesítésével, így reprodukálhatóvá tehető a lézerrendszernek ez a része, a képletek egyes bemenő adatainak szerepe elemezhető.
- Az impulzusos üzemű lézeres vágás egyes beállításit és fontos működési paramétereit sokszor nem közlik teljesen rekonstruálható módon a szakcikkekben. Ezek nem függetlenek egymástól, a szakirodalomban különböző helyen lévő képletek egyidejű figyelembevételével rekonstruálni szeretném a teljes technológiai paraméterhalmazt a kísérletek megismételhetősége és továbbfejlesztése érdekében.
- Az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia kifejezésére szeretnék képletet alkotni sztentgyártási csövek axiális vágását figyelembe véve. Ennek az ad jelentőséget, hogy ha túl nagy az egységnyi térfogatra jutó energia, akkor a megmunkált cső átellenes oldala hőkárosodást szenved, a hőkárosodás rontja a korrózióállóságot, ezzel a biztonságot is.
- Átfogó értékelési rendszert szeretnék kidolgozni a sztentek lézeres vágási hibáinak biztonságalapú értékelésére. A sztentgyártás optimalizálására alkalmas biztonsági szempontrendszer kidolgozása. A vágás hiba funkcionális biztonságot érintő mértékének kiszámításához létre szeretnék hozni egy rangsorolási rendszert. Azt fogom bizonyítani, hogy minél kisebb a vágási hibák súlyozott összege, annál jobban garantálható a sztent funkcionális biztonsága az emberi szervezetbe való beépítés oldaláról nézve, tehát végső soron a technológia biztonságossá tétele a cél.

- A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására eszközt szeretnék kifejleszteni. Ezzel meg lehet majd vizsgálni különböző lézerberendezéseken az impulzusos üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését. A módszert ausztenites rozsdamentes acél, réz és ezüst anyagokon fogom vizsgálni, működőképességét igazolni kísérleti programok végrehajtásával és kiértékelésével. Itt a különböző fókuszpozícióban létrehozott furatok szabályosságának és hibáinak elemzése jön szóba.

Kutatási módszerek

Szakirodalmi képletek szintézisével és továbbfejlesztésével, egyes esetekben új, képletek alkotásával foglalkoztam, céljaim:

- A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz (később ismertetett) képletének továbbfejlesztése a nyalábtágító hatásának figyelembevételével.
- Az anyagmegmunkáló szállézeres nyalábjellemzőire a szakirodalomban különböző helyen lévő képletek együttes figyelembevétele, analizálása, hiányzó adatok kiszámolása.
- Az impulzusos üzemi lézeres vágás egyes beállításainak rekonstruálása a szakirodalomban különböző helyen lévő képletek egyidejű figyelembevételével.
- Az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia kifejezésére számítási módszert alkottam sztentgyártási csövek vágásának kísérletei eredményeit figyelembe véve. Itt az impulzusenergia, impulzusfrekvencia, a cső falvastagsága, a vágási rés szélessége a bemenő adatok.

Átfogó értékelési rendszert dolgoztam ki a lézeres sztentvágás hibáinak biztonság alapú számszerűsítésére. Ennek bemenő adatai közé tartozik a vágási rés keresztmetszeti metallográfiai képe, ezen alapul a különféle vágási hibák súlyozottan számszerűsített tényezőinek összege.

A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására szinusz mechanizmus alapján tervezett eszközt fejlesztettem ki. Ezzel megvizsgáltam különböző lézerberendezéseken az impulzusos üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését ausztenites rozsdamentes acél, réz és ezüst anyagokon.

Kísérleteket végeztem a kétféle lézerrendszeren sztentgyártási csövek vágására és a fent említett fóliák fúrására. A lézeres megmunkálási kísérletek után a próbadarabokról és azok

metallográfiai csiszolatairól makroszkópos és mikroszkópos vizsgálatokkal készült makro- és mikroszerkezeti képek elemzését és értékelését végeztem. A fókuszpozíció-furatátmérő függvények ábrázolására és polinomillesztésre a Microsoft Excel programot használtam.

A folyamatok és eredmények jobb megértéséhez ábrákat készítettem.

1 A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

1.1 A nagy pontosságú lézeres vágás és fúrás alkalmazásai

A precíziós lézeres 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 nagy pontosságú vágás más alkalmazásai:

- NYÁK-re történő forrasztópasztá-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 tantálnitrid vagy tantál. [4]
- Órarugók kivágása karórákhoz [5]
- Ékszerésziparban ezüst ékszerek kivágása

A nagy pontosságú 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°-os zsákfuratok készítése.
- Sebészeti tű végébe zsákfurat a varrósál rögzítéséhez.
- Gázturbinalapátok léghűtéséhez furatsorok létrehozása [6]
- Dízelmotorok befecskendező fúvókái [7]
- Gyémántban furat készítése nagy teljesítményű húzókövek készítésére kis átmérőjű húzalok gyártásához [7]

Egyéb alkalmazások [8]:

- Kalibrált áramlási furatok 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 készítés (stimuláció) hatására is. Ezt a jelenséget nevezték el stimulált emisszióknak. 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 ismert volt, 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” [9].

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 infravörösig tart (CO₂ - 10,6 μ m), azonban a kísérleti célokból megépített lézerek ennél nagyobb tartományt fognak át (H₂-lézer 110 nm, metanollézer ~37–1000 μ m)” [10].

b) Monokromatikusság, egyszínűség

„A lézersugárzás spektruma ideális esetben egyetlen spektrális vonalból áll, melynek szélessége, a sávzélesség, 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.” [10]

c) Divergencia, széttartóság

„A lézerek többségének 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.” [10]

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.” [10] Jelen értekezésben használt lézerek (mikromegmunkálásra kifejlesztett Corina Nd:YAG lézerrendszer, és az IPG gyártmányú YLR-150/1500-QCW-AC-Y11 szállézer 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 sáv szélesség csökkenti a sugárzás koherenciáját.” [10]

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

A lézeres gyártás – jelen esetben a fűrés 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 európai 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.[11]

Lézergyártmányokra vonatkozó szabványok:

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

Az előbb említett szabvány tekintetében gyártók nyilatkozata alapján mindkét általam használt lézerrendszer, melyet a későbbi 7. fejezetben ismertetek a legveszélyesebb 4. osztályba tartozik. Ebben a lézerosztályban az elsődleges védelem a lézerberendezés burkolata.

MSZ EN 60825-4:2006/A2:2011 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 4. rész: Lézervédelmek [12]

IEC TR 60825-14: 2004. Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírása. 14. rész: Felhasználói útmutató [13]

MSZ EN ISO 11252:2013 Lézerek és lézerberendezések. Lézerkészülékek. A dokumentáció minimumkövetelményei [14]

Védőernyőkre, szemvédőkre vonatkozó szabványok:

MSZ EN 12254:2010 Lézermunkahelyek védőernyői. Biztonsági követelmények és vizsgálat [15]

MSZ EN ISO 19818-1:2021 Szem- és arcvédelem. Lézersugárzás elleni védelem. 1. rész: Követelmények és vizsgálati módszerek [16]

MSZ EN 207:2017 Személyi szemvédő eszközök. Szűrők és szemvédők lézersugárzás ellen [17]

MSZ EN 208:2010 Személyi szemvédő eszközök. Szemvédők lézerek és lézerrendszerek beállítási munkáihoz (lézerbeállítási szemvédők) [18]

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 [19] 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 [20]

MSZ EN ISO 13849-1:2016 Gépek biztonsága. Vezérlőrendszerek biztonsággal összefüggő részei. 1. rész: A tervezés általános alapelvei [21] Ez is két részes szabvány.

MSZ ISO 31000:2018 Kockázatmenedzsment. Irányelvek [22]

MSZ EN ISO 12100:2011 Gépek biztonsága. A kialakítás általános elvei. Kockázatfelmérés és kockázatcsökkentés [23]

1.4.2 Európai Unió irányelvek

(89/391/EGK) a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítását ösztönző intézkedések bevezetéséről [24]

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) [25]

Nem kötelező érvényű útmutató a 2006/25/EK irányelv végrehajtása során alkalmazható legjobb gyakorlatokhoz (Mesterséges optikai sugárzás) 150 oldal [26]

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) [27]

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 [28]
- 4/2009. (III. 17.) EüM rendelet az orvostechnikai eszközökről [29]
- 22/2012. (IX. 14.) EMMI rendelet az egészségügyi felsőfokú szakirányú szakképesítés megszerzéséről [30]
- 156/2017. (VI. 16.) Korm. rendelet a haditechnikai tevékenység engedélyezésének és a vállalkozások tanúsításának részletes szabályairól [31]

2 A NYALÁBMINŐSÉGI TÉNYEZŐ ÉS A FÓKUSZÁLT LÉZERNYALÁB JELLEMZŐI

2.1 A nyalábminőség mérőszámai

A fókuszáltnyaláb-keresztmetszet két legfontosabb jellemzője a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz definíciójában szerepel a nyalábminőségi tényező. Jó, ha tudjuk milyen megadási módjai vannak a nyalábminőségnek, és azt is, hogyan lehet ezeket egymásba átszámolni.

A nyalábparaméter-szorzat (BPP) a lézernyaláb fókuszálhatóságát fejezi ki, melyet leggyakrabban a rezonátorbeli nyalábderek-átmérő: $d_{\sigma 0}$ és a távoli mezői divergenciaszög, Θ_{σ} szorzataként adnak meg, amit 4-gyel elosztanak. Itt Θ_{σ} : a táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge (I) [32]. A formai követelmények alapján az értekezés végén található az értekezésben jellel ellátott mennyiségek jeleit, megnevezéseit, és mértékegységeit tartalmazó 21. és 22. táblázat.

$$BPP = \frac{d_{\sigma 0} \Theta_{\sigma}}{4} \quad (1)$$

Egy további megadási mód az M^2 nyalábminőségi tényező, ez annak a mértéke, hogy mennyire közelíti meg a nyalábparaméter-szorzat az ideális Gauss-nyaláb diffrakciós határát, ez a (2) egyenletben szerepel, ahol λ a lézersugárzás hullámhossza [32].

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma 0} \Theta_{\sigma}}{4} \quad (2)$$

A harmadik megadási mód a K nyalábterjedési tényező, mely M^2 reciproka: [32]. Nem ideális nyalábra $M^2 > 1$, 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. A nyalábminőséget tárgyalják még a következő cikkek: [33], [34], [35], [36].

2.2 A fókuszfoltátmérő képletének származtatása

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, és a vágási sebesség is növelhető. Mivel jelen értekezésben a lézeres vágás a sztentek előállítására vonatkozik, ahol többnyire oxigén munkagázt használnak, megjelenik a salak [37], [38], [39]. A kevésbé szétterülő nyaláb miatt a hőhatás-övezet is kisebb. A fókuszfoltátmérőjének 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 nyalábminőségi tényezőt kell beírni a képletbe.

Kaplan [40] egyenlete a fókuszfoltátsugárra, r_{f0} -ra az (3). egyenletben található, ezt a sugarat a fókuszfoltbeli intenzitásmaximum $1/e^2$ -ed részére csökkenése jellemzi. Itt f a fókuszálólencse fókusz távolsága, d_b a fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője, ez a képlet akkor érvényes, ha nincs nyalábtágító a rendszerben.

$$r_{f0} = \frac{2\lambda f}{\pi K d_b} \quad (3)$$

A fókuszfoltátmérő: $d_{f0} = 2r_{f0}$ és $M^2 = 1/K$ behelyettesítéssel a (4) egyenletet adja a fókuszfoltátmérőre.

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

Paprikás et al. [41] a saját jelöléseim használatával az (5). egyenletet közli, ami egyszerűsítés után szintén a (4).egyenletre vezet. Harp et al. [42] cikke, mely az International Journal of Advanced Manufacturing Technology tudományos folyóiratban jelent meg, szintén ezt az egyenletet adja.

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

2.3 A Rayleigh-hossz képletének származtatása

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszsíktól mért az a hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádiusza gyök kettő szeresére nő, ezért a felületegységre jutó impulzusenergia a felére esik vissza a fókuszfoltban számíthatóhoz képest. Általában a Rayleigh-hossz kétszeresén belül tekintik fókuszban levőnek a nyalábot, ezt nevezzük fókusz-mélységnek, tehát ha lézeres vágásról van szó, körülbelül ilyen vastag anyagot tud átvágni a lézer.

Most vizsgáljuk meg a Rayleigh-hossz képleteit a szakirodalomban. Kaplan [40] összefüggése a Rayleigh-hosszra: (6). egyenletben található.

$$Z_R = \frac{4\lambda f^2}{\pi K d_b^2} \quad (6)$$

$M^2 = 1/K$ behelyettesítéssel az (7) egyenletet adja a Rayleigh-hosszra.

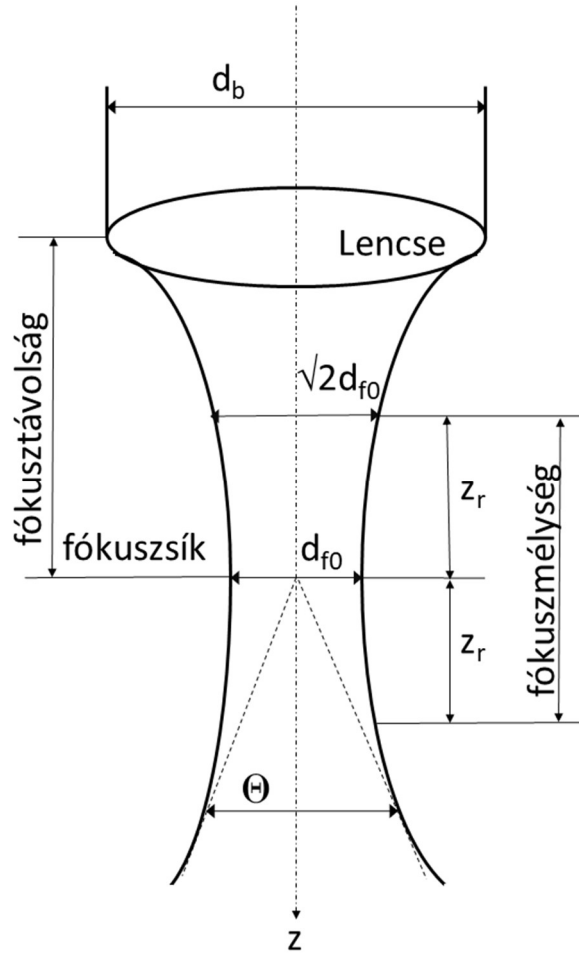
$$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{d_b^2 \pi} \quad (7)$$

Két internetes forrás ugyanazt a képletet adja a Rayleigh-hosszra, itt a fókuszfolt sugarat a saját jelölésemre írtam át (8). A két említett forrás: [43] az rp-photonics honlapja és [44] Berkeley Egyetemé.

$$Z_R = \frac{\pi r_{f0}^2}{M^2 \lambda} \quad (8)$$

A (8) egyenletbe $d_{f0}=2r_{f0}$ behelyettesítéssel, és a (4) egyenlet négyzetét behelyettesítve ugyancsak az (7). egyenletet kapom. A Rayleigh-hossz képlete nagyon hasonló a foltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz távolsága és a lencse előtti nyalábátmérő a négyzeten szerepel, ezt mutatja a (7). egyenlet.

A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőit az 1. ábra szemlélteti, ahol a z koordináta a lézernyaláb terjedési irányába mutat, Θ a fókuszált nyaláb széttartási szöge. Az 1. ábra a [40] ábrájának jellemzői alapján készült.



1. ábra

A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése [40]

2.4 A nyalábtágító hatásának figyelembevétele a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletében.

Vizsgáljuk meg a nyalábtágító hatását a fókuszfoltátmérőre. Ha a fókuszálólencsére eső közel kollimált lézernyalábot tágítjuk, egy Galilei teleszkóppal modellezhető nyalábtágítóval, akkor a d_0 nyalábtágító előtti nyalábmérő szorozódik a nyalábtágító tényezőjével, vagyis egy dimenzió nélküli számmal (Be), ami megmondja, hogy hány-szorosa lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest, így a (4). átalakításával adódik a (9.) egyenlet. A nyalábtágító utáni nyaláb azért

is tekinthető párhuzamosnak, mert a nyalábban a nyalábátmérő és divergencia szorzata állandó, tehát, ha a tágitás miatt nő a nyalábátmérő, akkor csökken a divergencia, tehát a nyaláb az a hosszmetzeti határolóvonala közel párhuzamosan lép a fókuszálólencsébe. Ezt a fejezetet az [MGY7] [MGY8] publikációim alapján írtam.

$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_0 B_e} \quad (9)$$

Vizsgáljuk meg a nyalábtágító hatását a Rayleigh-hosszra. Ennek képletében is szorozódik a d_0 nyalábtágító előtti nyalábátmérő a nyalábtágító tényezőjével, vagyis egy dimenzió nélküli számmal (B_e). Ebben a képletben (l_0) a fókuszálólencse előtti nyalábátmérő a nevezőben négyzeten szerepel, tehát B_e tényezőt is négyzetre kell emelni.

$$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_0^2 B_e^2} \quad (10)$$

A (9) és (10) képlet új tézis (3. tézis), eddig még nem szerepelt a szakirodalomban.

Bizonyos szakirodalmak nem veszik figyelembe a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz számításánál a nyalábminőség mérőszámait, holott a nyalábminőségi tényező méréséről az MSZ EN ISO 11146-1:2021 [45] szabvány rendelkezik.

2.5 A fókuszált lézernyaláb burkológörbájének származtatása

A fókuszfoltátmérője és a Rayleigh-hossz alapján a $d_f(z)$ függvénnyel leírható a fókuszált nyaláb geometriája: a nyalábátmérő a nyalábterjedés irányába mutató z -koordináta függvényében, ahol z_0 a fókuszszík z -koordinátája (II), [40].

$$d_f(z) = d_{f0} \sqrt{1 + \left(\frac{z-z_0}{Z_R}\right)^2} \quad (11)$$

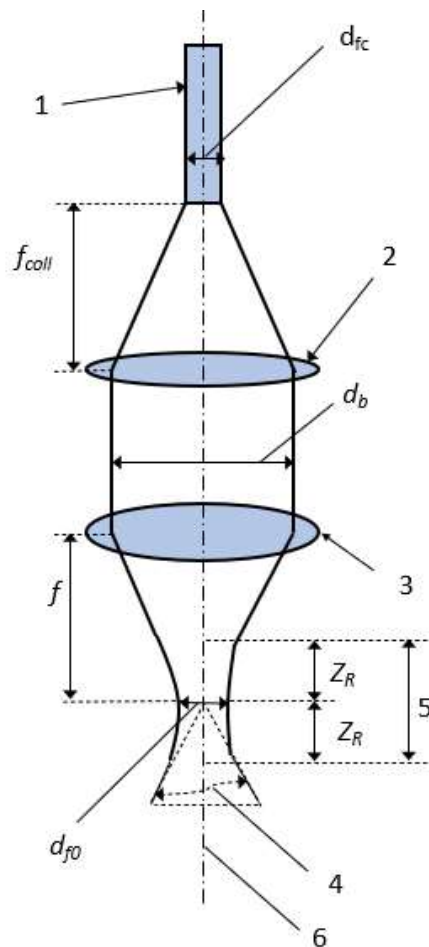
3 A SZÁLLÉZEREK NYALÁBJELLEMZŐ ADATAI A NYALÁBVEZETŐ SZÁL VÉGÉTŐL A FÓKUSZFOLTIG

Az értéktartó sztenteket 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-rácscsal ellátott [46], 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 kollimátorlencse, a párhuzamos lézernyalábot a munkadarabra koncentrálja a fókuszálólencse. Korábban ismertettem a fókuszfoltátmérő: (4), és a Rayleigh-hossz: (7) képletét. Ezt a fejezetet az [MGY4] [MGY5] publikációim alapján írtam.

A szakirodalomban található még egy képlet szállézerek fókuszált nyalábjának, fókuszfoltátmérőjének megadására, melyben f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszálólencse fókusz távolsága, d_{fc} a nyalábtovábbító optikai szál magátmérője f_{coll} a nyalábot párhuzamosító kollimátorlencse fókusz távolsága: ezt összegzi a (12). képlet [42], [47], [48]. Ezt a képletet mindhárom hivatkozott irodalom közelítő képletnek nevezi, ezért az ennek alapján kiszámolt értékeket két értékes jegyre adom meg.

$$d_{f0} = \frac{d_{fc}f}{f_{coll}} \quad (12)$$

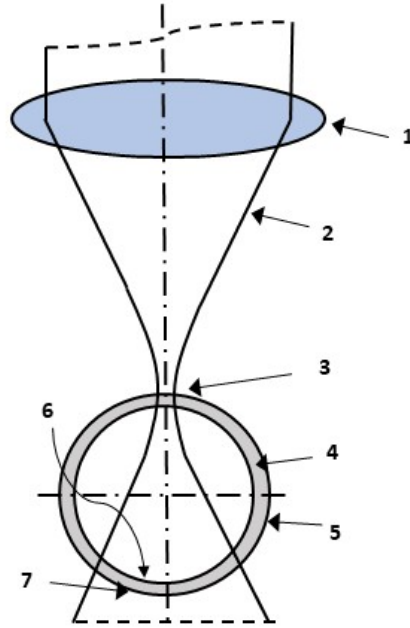
Az eddig tárgyalt optikai elemeket és a lézer nyalábjellemzőit az 2. ábra mutatja. A (12). képletet elemezve, ha a fókuszálólencse fókusz távolságát csökkentjük, akkor elvben a foltméret lineárisan csökken, és a (7). képletből következik, hogy a Rayleigh-hossz négyzetesen csökken. Az (9). képletet elemezve, ha a lézernyalábot x -szeresére tágitjuk, akkor elvben a foltméret $1/x$ függvény szerint csökken, és a (7). képletből következik, hogy Rayleigh-hossz $1/x^2$ függvény szerint csökken. Azért elvileg, mert rövidebb fókuszú fókuszálólencsét használva nő a szférikus aberráció, romlik a nyalábterjedési tényező, tehát d_{f0} és Z_R nem annyira erősen csökken [MGY1].



2. ábra
A fókuszált lézernyaláb jellemzői

1 – nyalábtovábbító optikai szál belső magja, 2 – kollimátorlencse, 3 – fókuszálólencse, 4 – divergenciaszög, 5 – fókuszmélység, 6 – nyalábtengely d_{fc} – nyalábtovábbító optikai szál belső magjának átmérője, d_b – párhuzamosított nyaláb átmérője, f_{coll} – kollimátorlencse 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 [49], 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 csőfalán defókuszba kerül a nyaláb, tehát szétterül, s így nem lesz vagy kevésbé lesz hő okozta átalakulás a cső szemközti belső falában (3. ábra).



3. 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

Most a szállézeres sztentgyártási szakirodalom elemzésével bemutatom, hogy hogyan lehet az egyes cikkekből kihagyott előbb említett nyalábjellemző adatokat kiszámolni, és ezzel a kísérleteket jobban reprodukálhatóvá tenni. A megadott és kiszámolt adatokat a 1. táblázat tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket vastag és dőlt betűvel szedve tüntettem fel.

Publikáció	Chen et al 2012 [50]	Demir et al. 2013 [51]	García-López et al 2016 [52]	Catalano et al. 2017 [37]
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 nyalábminőségi 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

1. táblázat A sztentgyártásra használt szállézerekben előállított lézernyalábok jellemzői

Chen [50] cikkében először a párhuzamos lézernyaláb átmérőjét lehet kiszámítani (4) egyenlet rendezése alapján, mely a (13). egyenletet adja. A párhuzamos lézernyaláb átmérőjére a 1. táblázat első oszlop adatainak behelyettesítése után 3,8 mm-re adódik, így már minden adat rendelkezésre áll a Rayleigh-hossz kiszámításához, ami a (7). egyenlet alapján 96 mikrométerre adódik.

$$d_b = \frac{4\lambda M^2 f}{d_{f0}\pi} \quad (13)$$

Demir [51] cikkében a 1. táblázat 2. oszlop adatainak behelyettesítésével minden adat rendelkezésre áll a fókuszálólencse fókusztávolságának kiszámításához. Ennek elvégzéséhez át kell rendezni f-re a (4). egyenletet így kaptam a (14)-et, melyből 60 mm jön ki fókuszálólencse fókusztávolságra.

$$f = \frac{d_{f0}d_b\pi}{4\lambda M^2} \quad (14)$$

Ezek után minden adat rendelkezésre áll a Rayleigh-hossz kiszámításához, melyre a (7). egyenlet alapján 230 μm adódik.

García-López [52] cikkéből a nyalábvezető szál átmérője a 1. táblázat 3. oszlop adatait felhasználva a (12). egyenletből d_{fc} -t kifejezve kapjuk a (15). egyenletet, melyből a nyalábvezető optikai szál belső átmérője kiszámolható, ez 50 μm -re adódik. Ezután az (13). egyenletből a párhuzamos nyaláb átmérője 9,2 mm-re adódik ki, majd a Rayleigh-hossz kiszámolható, melyre a (7). egyenlet 113 μm -t ad.

$$d_{fc} = \frac{d_{f0}f_{coll}}{f} \quad (15)$$

Végül Catalano [37] cikkéből a 1. táblázat 4. oszlop adatait behelyettesítve a párhuzamos lézernyaláb átmérőjét a (13) egyenletből 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.

A fentiekben bemutatott módszert – a szállézerek publikációkból hiányzó nyalábjellemző adatainak kiszámítását beépítettem a 2. tézisbe.

<i>Cikk</i>	<i>Chen et al 2012 [50]</i>	<i>Demir et al. 2013 [51]</i>	<i>García-López et al 2016 [52]</i>	<i>Catalano et al. 2017 [37]</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>1.4441</i>	<i>AZ31 magnézium-ötvözet</i>	<i>1.4404 rozsdamentes acél</i>	<i>1.4404 rozsdamentes acél</i>
<i>Falvastagság (μm)</i>	<i>80</i>	<i>200</i>	<i>220</i>	<i>200</i>
<i>Cső külső átmérő (mm)</i>	<i>3,0</i>	<i>2,5</i>	<i>3,0</i>	<i>n.a.</i>

2. táblázat A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

Az eddig elemzett kísérleteknél használt lézerberendezések, valamint a felhasznált anyagok jellemzőit és geometriai adatait a 2. 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 nyalábminőségi tényezőnek a lézerrendszeren belüli, főleg a zoomos nyalábtágító lencsehibái miatti romlásával, amit egy korábbi cikkemben elemeztem [MGY1].

Ha most a jelen fejezetben vizsgált sztentvágásra használt lézerek és a korábbi cikkemben vizsgált mikromegmunkáló szállézerek néhány fontos adatának tartományát összehasonlítom (3. táblázat), akkor az alábbi következtetéseket vonhatom le:

- A sztentvágásra használt lézerek fókuszfoltátmérőjének átlaga kisebb, mint az általános mikromegmunkálásban használt szállézereké, ez nagyobb energiakoncentrációt, és nagyobb vágási sebességet tesz lehetővé.
- A sztentvágásra használt lézerek fókuszálólencséje fókusztávolságának átlaga kisebb, mint az általános mikromegmunkálásban használt szállézereké, ez kisebb fókusztátmérőt okoz: ld. 3. táblázat.
- A sztentvágásra használt lézerek kollimátor lencséje fókusztávolságának átlaga nagyobb, mint az általános mikromegmunkálásban használt szállézereké, ez kisebb fókusztátmérőt okoz: ld. (18) [46] egyenlet.

- A sztentvágásra használt lézerek Rayleigh-hosszának átlaga kisebb, mint az általános mikromegmunkálásban használt szállézereké, ez még lehetővé teszi a csőfal átvágását, de segít abban, hogy a cső átellenes belső falán a fókuszált lézernyaláb defókuszba kerüljön (3. ábra).

Az mikromegmunkáló lézerek összehasonlításából Guerra [53] cikkét kihagytam, mivel itt a fókuszfoltátmérő 150 mikrométer és a Rayleigh-hossz 14867 mikrométer kiugróan nagy érték a többi lézeréhez képest.

	<i>Ebben az értekezésben vizsgált sztentvágásra használt lézerekénél</i>	<i>Általános mikromegmunkáló szállézerekénél [MGY2]</i>
$d_0 (\mu m)$	12–23	9,4–73
$f (mm)$	30–80	50–190
$f_{coll} (mm)$	50–120	28,4–50
$Z_R (\mu m)$	96–367	131–3154

3. táblázat

A sztentvágó és az általános mikromegmunkáló lézerek adatainak összehasonlítása

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

4 A NAGY PONTOSSÁGÚ LÉZERES VÁGÁS TERÜLETE ÉS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI

Az értekezésben az impulzusos üzemű lézeres mikromegmunkálással, ezen belül vágással és fúrással foglalkozom. Szeretném ezt a területet elhatárolni a következőktől az egyértelmű azonosítás miatt, ez a terület különbözik:

- 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

A lézersugaras vágásnak három alapvető módja van: a semleges munkagázzal végzett olvasztós vágás, az oxigén munkagázzal végzett vágás, az oxigén exoterm reakcióba lépve az anyaggal gyorsítja a vágást, és végül a párologtatós vágás. A valóságban ezek keverednek egymással, például semleges munkagázt használó vágásnál a lézernyaláb a szélén olvasztja az anyagot, a közepén pedig párologtatja. A vágási front pedig ferde.

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 nagy pontosságú lézeres megmunkálás adatainak rendszerét az értekezés végén található 23. táblázat tartalmazza. Nézzük sorra ezeket az egyszerű képleteket. Az átlagteljesítmény: P_{av} (W) egyenlő az impulzusenergia E_i (mJ) és az impulzusfrekvencia

f_i (kHz) szorzatával, itt a millijoule mértékegység miatt lenne 1000-rel osztás, és a kHz miatt 1000-rel szorzás, ezek kiegyeszerűsítődnek ((16)).

$$P_{av}(W) = E_i(mJ)f_i(kHz) \quad (16) [54]$$

Most definiálom a munkadarabon az két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság (D_{BT}) fogalmát: A lézerimpulzusok fotonhalmazai által a munkadarab felületén létrehozott és látható két szomszédos elválkozás középpontja közötti távolság. Tehát a vágási sebesség v (mm/s) az anyagon mért két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti 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 kiegyeszerősítődnek ((17)

$$v \left(\frac{mm}{s} \right) = D_{BT}(\mu m) f_i(kHz) \quad (17)$$

A (18) szerint az impulzus-átlagteljesítmény P_i (W) az impulzusenergia és az impulzusidő t_i (ms) hányadosa. Itt a milli prefixumok esnek ki.

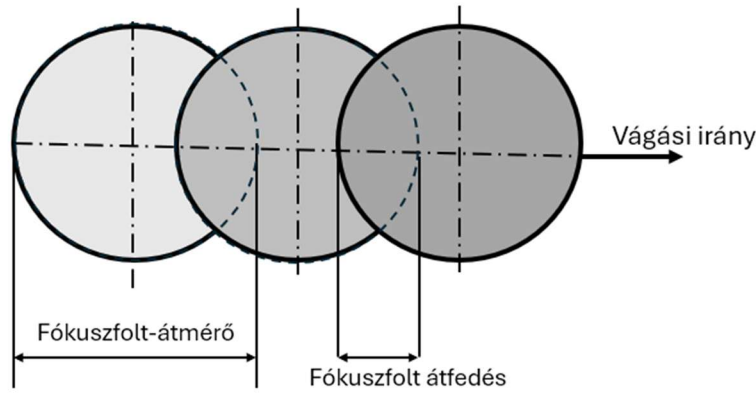
$$P_i(W) = \frac{E_i(mJ)}{t_i(ms)} \quad (18) [46]$$

4.1 A fókuszfoltátfedés 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, amit később ismertetek. Az sem mindegy, hogy mekkora a fókuszfoltátmérő: ennek alapján lehet fókuszfoltátfedést, számolni, minél nagyobb a fókuszfoltátfedés, annál közelebb esnek egymáshoz az anyagra lőtt impulzusok nyomai.

A nyaláb sugara az az optikai tengelytől mért távolság, ahol az intenzitásmaximum az $1/e^2$ értékre csökken. A fókuszfoltátmérő ennek duplája.

Muhammad sztentvágásról szóló doktori értekezésében közölt [46] ábrából következik, hogy a korábban használt fókuszfoltátfedésre a pulse overlap (PO) kifejezést használja a szerző, mely a lineáris koordináta mentén a két egymást követő impulzus fókuszfoltját tekintve, azoknak a lineáris koordináta mentén értendő átfedését érti (4. ábra). Ezt úgy kell érteni, hogy ha egyhelyben ad le a lézer impulzusokat, akkor a fókuszfoltátfedés 100%, ha pedig az egyik fókuszfolt 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 fókuszfoltok, akkor pedig 0% az átfedés. A nagy impulzusfrekvencia szignifikánsan növeli az impulzusátfedést, ami hatásosabb anyageltávolításhoz vezet. A dolgozat SEM felvételein látszik, hogy ebben az esetben egy impulzus nem fűrja át az anyagot. Nagy frekvencia javítja a vágási rés felületi minőségét a nagy impulzusátfedés miatt. [46]



4. ábra
A fókuszfoltátfedés szemléltetése

Muhammad fókuszfoltátfedés (nála: pulse overlap: PO) képletét a (19). egyenlet mutatja.

$$PO = \left(1 - \frac{v}{d_{f0}f_i}\right) \quad (19)$$

García López et al. [52] 2016-os cikkében 1.4404 rozsdamentes acélcsövek szállézeres mikrovágását vizsgálja. Ezen belül az impulzusenergia és a foltátfedés hatását a cső hátsó falán lerakódó salakra. Az absztraktból kiderül, hogy sztentvágás a cél. Az impulzusátfedési tényezőt: PO%-ot a (20)-as egyenlet írja le, melyből kiderül, hogy PO% százalékos átfedést jelent, itt d_{f0} a fókuszfoltátmérő, lényegében ez a képlet megegyezik Muhammad képletével.

$$PO\% = 100 \left(1 - \frac{v}{f_i d_{f0}}\right) \quad (20)$$

Az impulzusátfedési tényezőt: O_f a vágási él periodikus bordázottságához kötődik, ami a lézer impulzusos üzemmódja miatt van.

Chen et al. [55] 2000-ben orvostechikai eszköz impulzusos üzemi megmunkálásról írt tudományos cikket, itt átfedési számot vezet be, amelynek a fókuszfolt rádiusz az alapja, tehát ez is fókuszfoltátmérőhöz köthető.

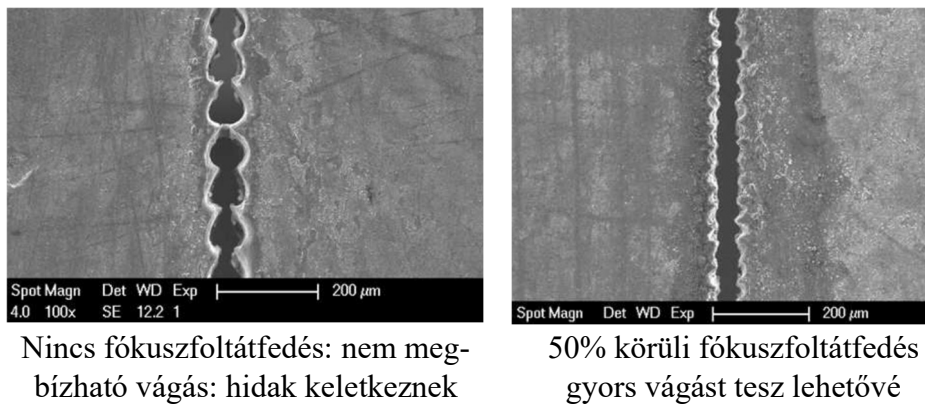
Saját képletemben (21) a két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság szerepel, ez is megegyezik a fentiekkel, ahol a második egyenletforma (22) a jobban értelmezhető százalékos fókuszfoltátfedést jelenti.

$$PO = 1 - \frac{D_{BT}}{d_{f0}} \quad (21)$$

$$PO\% = \left(1 - \frac{D_{BT}}{d_{f0}}\right) \cdot 100\% \quad (22)$$

A képletek egyezőségéből következik, hogy mindhárom fogalom ugyanazt jelenti, de mivel a viszonyítási alap a fókuszfoltátmérője, legjobb fókuszfoltátfedésnek hívni. Az 5. ábra mutatja a fókuszfoltátfedést a gyakorlatban.

A fenti fókuszfoltátfedés képletek azért hasznosak, mert az ultrarövid impulzusú lézerekkel történő vágás abláción alapszik, tehát egy impulzus nem fúrja át az anyagot. Ezen esetekben nem alkalmazható olyan képlet, ahol a fókuszfoltátmérő helyett egy impulzus által készített furatnak a munkadarab felső síkján mérhető átmérője szerepel, ilyen Thawari et al. [54] cikkében található képlet.



5. ábra Fókuszfoltátfedés szemléltetése

Valójában a vágási sebességet, mint technológia paramétert állítva változik a fókuszfoltátfedés, de elemezhetem a fókuszfoltátfedés változásának hatását a vágási sebességre vonatkozóan:

Az impulzusfrekvencia limitálja a vágási sebességet: ha nincs fókuszfoltátfedés az anyagon, akkor csak különálló furatok jönnek létre, vagy az impulzusenergia kismértékű változása miatt hidak képződnek (5. ábra bal oldali része).

Ha nincs fókuszfoltátfedés, 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 eredményez vágást. A ténylegesen elérhető vágási sebesség ennek fele (50%-os átfedés) $= 18 \text{ mm/s}$ (5. ábra jobb oldali része). Egy korábbi kísérletemnél is e körül volt a maximális vágási sebesség: 15 mm/s -ot értem el [MGY12].

Ez a gondolatmenet kis fókuszfoltátfedéseknél csak akkor igaz, ha egy impulzus át tudja fúrni az anyagot. Azonban a kísérleteknél is bebizonyosodott, hogy ha azonos impulzus átlagteljesítményt feltételezünk, akkor nagyobb frekvencia és kisebb energia kombinációnál előfordul, hogy egy impulzus nem fúrja át az anyagot, így nagy fókuszfoltátfedés kell a vágás eléréséhez, ezért kisebb az elérhető vágási sebesség. Külön eset az ultrarövid impulzusidejű (ps, fs) impulzusos vágás, ahol az anyag egy vékony rétege elpárolog, tehát abláció az anyagmegmunkálás módja, itt 90% feletti fókuszfoltátfedésre van szükség [46], [37].

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

4.2 Az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia kiszámítása axiális lézeres vágás esetén

Az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia: E_v kiszámítása következik a vágási rés keresztmetszet felső szélessége alapján (23). Ez a képlet szerepel a 4. tételben. Ezt a fejezetet az [MGY6] publikációm alapján írtam.

$$E_v = \frac{E_i \cdot 1000 \mu\text{m}}{D_{BT} \cdot 1 \text{ mm} \cdot a_v \cdot \left(\frac{k_1}{1000}\right)} \quad (23)$$

A 23. képlet magyarázata: ha 1000 mikrométert elosztom az impulzusok közti távolsággal, akkor megkapom az 1 mm vágási hosszra jutó impulzusok számát, ezt beszorozva egy impulzus energiájával, megkapom az 1 mm vágási hosszra jutó energiát. Most már csak azt a térfogatot kell kiszámolni, amelyben eloszlik ez az energia. A térfogatot úgy kapom meg, hogy az 1 mm hosszat beszorzom a keresztmetszettel, ami jelen esetben az a_v falvastagság és a vágási rés keresztmetszet felső szélességének (k_1 -nek) szorzata. Mivel az energiát az eltávolított térfogattal osztom, a számítás eredményét az eltávolított térfogattal osztom, ezért lehet egységnyi térfogatra jutó energiának is nevezni. Ebben két kompromisszum van, az egyik: a vágási rést két

felület határolja, ami nehezen mérhető, viszont a vágott cső tengelyére merőleges keresztcsíszolat készítésével előállítható a vágási rés egy keresztmetszete, ennek értelmezhető a felső szélessége. A másik kompromisszum, hogy a trapéz alakú vágási résnek csak a felső szélességét veszem alapul, mert a legtöbb cikkben a vágási rés felső szélessége adott.

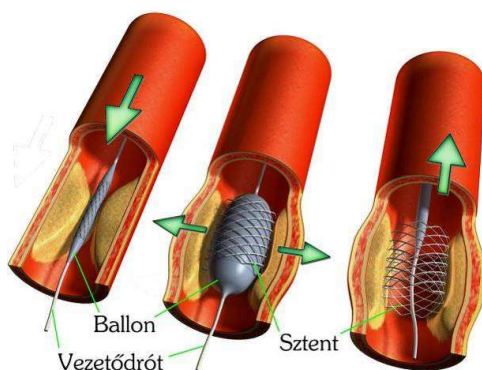
Itt a milli prefixum kiegyszerűsödik, mert az impulzusenergia mJ-ban van, amit 1000-rel kell osztani a joule-ba való átváltáshoz, a nevezőben az anyagvastagság mikrométerben van, amit szintén 1000-rel kell osztani a mm-re való átváltáshoz, így a számlálóban és a nevezőben található 1000-rel osztás kiesik a képletből.

Ez a számítási mód azt feltételezi, hogy a vágási rés átlagos szélessége megegyezik a vágási rés tetejének szélességével, pedig a vágási rés keresztmetszete általában trapéz alakú, 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 (23).

5 SZTENTEK ÉS AZOK LÉZERES VÁGÁSA

„A sztent vagy a vaszkuláris sztent éren keresztül bevezetett ballonos tágítású vagy öntáguló implantátum, melynek célja, hogy fenntartsa vagy helyreállítsa az ér vérszállító funkcióját. „[57]

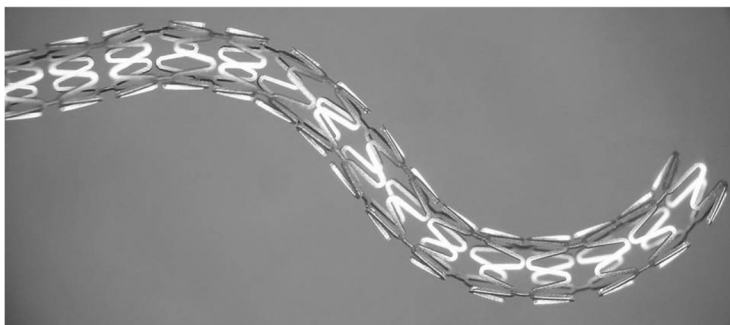
„A szív koszorúereinek szűkülete Magyarországon a leggyakoribb népbetegség. Az érszűkület azt jelenti, hogy az érfal belső részén lerakódások, ún. plakkok jönnek létre; ez az arterioszklerózis. A lerakódások idővel elhalnak, elmeszesednek, csökkentve ezzel az erek átmérőjét és rugalmasságát. Mindezek 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 szív-izomzat egy részének leállását és elhalását okozhatja; ezt a jelenséget nevezik szívinfarktusnak.[57] Az 1990-es évek közepétől a legfontosabb értágítási módszerré 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.” [57]



6. ábra
Sztentes értágítás [57]

„A koszorúér tágító sztentek fejlesztése 1993-ban indult el Magyarországon: az első hazai szabadalmi bejelentés 1996-ban történt [L. Major, “Endoluminális tágítóbetét enlarging facing for blood-vessels. Hungarian Patent, P9602099, 1996.”]” [58] , megelőzve az első külföldi gyártó szabadalmi bejelentését is [Medstent: Tágítható érfaltámasztó gyűrű EXPANDIBLE STENT. Hungarian Patent, P9900429, 1996] [59]. A lézeres gyártás 2005-ben indult a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék 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 10. ábra mutatja. Mint doktorandusz 2006-2010 között a sztent fejlesztő kutatócsoportban dolgoztam a BME Anyagtudomány és Technológia tanszékén Dobránszky János vezetése alatt.



7. ábra

Koszorúér tágító sztent (Minvasive Kft. Budapest, Magyarország)

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 lézerbeállítási csomag nem biztos, hogy elegendő a vágás elkezdéséhez, ekkor egy furatot szoktak először létrehozni, innen indul a vágás.

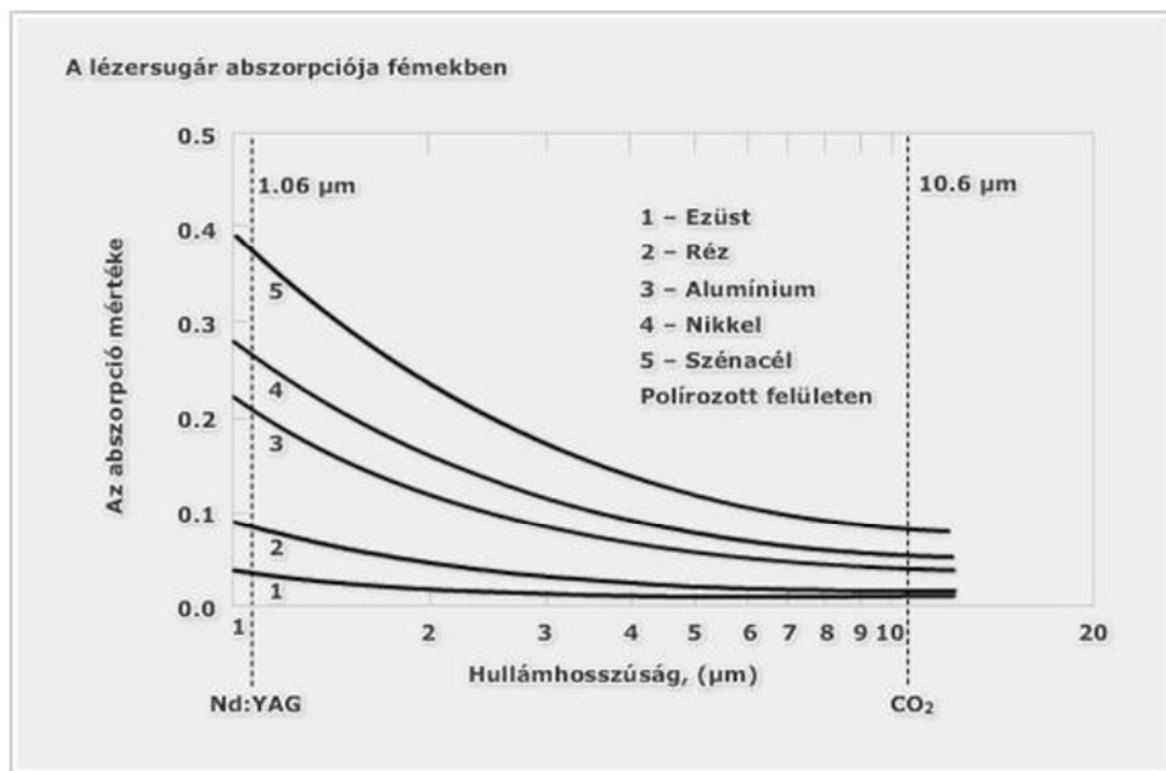
6 A LÉZERES FÚRÁS SZAKIRODALMA

A lézeres fúrás szakirodalmában Buza megkülönböztet egyimpulzusos fúrást (single pulse drilling), illetve „ütve fúrás” (percussion drilling), ahol a lézer egy furat kialakításához egyhelyben leadott több impulzust használ, a nagyobb furatok létrehozásához használt trepanációs (lékeléses, körkivágásos) fúrást és a bolygófurást [9].

Milyen paraméterek befolyásolják a lézeres fúrási folyamatot [60]?

1. A lézer hullámhossza

„A lézerfény azonos nyalábminőség mellett kisebb foltméretre fókuszálható, ha a fény hullámhossza rövidebb. Ez nyilvánvalóan lehetővé teszi kisebb átmérőjű lyukak fúrását. A rövidebb hullámhosszú lézernek azonban más előnyei is vannak: az energiacsatolás a munkadarabbal általában jobb. Az 8. ábra [9] mutatja öt különböző anyag abszorpcióját Nd:YAG és CO₂ lézer hullámhosszán, látszik, hogy a Nd:YAG lézer az előnyösebb, ezeknél az anyagoknál nagyobb az elnyelés. csóva kisebb abszorpciót mutat.” [60]



8. ábra
Különböző anyagok abszorpciója Nd:YAG és CO₂ lézer hullámhosszán [9]

2. Az impulzus-átlagteljesítmény.

„A furatok minősége általában javul az impulzus-átlagteljesítmény és a teljesítménysűrűség növekedésével. Ez elsősorban az olvadék kilökődéséről a párolgás által dominált anyageltávolításra való áttéréssel függ össze. Ez csökkenti a hőhatásövezetet és az újraöntött réteg vastagságát, mivel kevesebb anyag szilárdul meg a furatban, ami viszont növeli a furatok ismételtetését.” [60]

3. Impulzusidő.

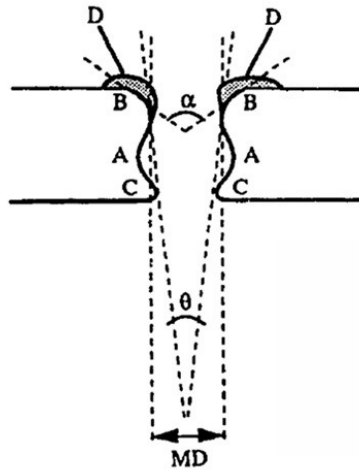
„A fúrásnál az impulzusidő fontos szerepet játszik. Mivel a rövidebb impulzusok jobb furatminőséget adnak (szintén az anyageltávolítási mechanizmushoz kapcsolódóan), a piko- (10^{-12} másodperc) és femtoszekundumos (10^{-15} másodperces) impulzusokkal működő lézerek alkalmazása előnyt jelent.” [60]

4. Gyújtótávolság és fókuszpozíció.

„A hosszú és rövid gyújtótávolságú fókuszálólencsének megvannak a maga előnyei és hátrányai. Például a nagy gyújtótávolság nagyobb fókuszmélységet, de nagyobb fókuszfoltméretet és ezáltal kisebb teljesítménysűrűséget eredményez. Ezzel szemben a rövidebb gyújtótávolságú fókuszálólencsék nagyobb teljesítménysűrűséget biztosítanak. A fókuszpozíciót illetően a fókuszfolt helytelen elhelyezése a felület felett vagy alatt általában befolyásolja a lyuk mélységét és kúpját.” [60]

5. Munkagázok.

„A munkagázok számos módon használhatók a fúrási folyamat elősegítésére. A gáz megvédi a lencsét a furatból kilökődő anyagtól, és minimalizálja a furat körüli olvadt anyag lerakódását. A gáz arra is használható, hogy megakadályozza a plazmacsóva [61] kialakulását a lyuk felett (amely elnyeli/szétoszorja a lézerefény nagy részét). A plazma fénylő fémgőz, amely a lézersugárzás által a munkadarabból spontán kisugárzott atomokból áll [61]. Oxigén segítheti az anyageltávolítást azáltal, hogy exoterm reakcióba lép a megmunkált anyagokkal.” [60]



9. ábra [62]

A lézerrel fúrt furat részletei. A-kiöblösödés, B-megömlött anyag, C-kimeneti kúp, D-felső felületi anyaglerakódás, α -bemeneti kúp, θ -kúpszög, MD-átlagos furatátmérő.

Kis átmérőjű furatoknál nehéz a furat tengelyén átmenő keresztcsiszolatot készíteni, a lézerrel fúrt furatok jellegzetes hibajelenségeit mutatja a 9. ábra.

Most elemezzük a lézeres fúrás előnyeit [63]:

- „• Érintésmentes folyamat, nincs szerszámkopás,
- Számos anyag fúrható, ami mechanikus módszerrel nehéz,
- Rövid ciklusidő,
- Különböző furatátmérők fúrására alkalmas,
- Jó ismételhetőség,
- Kis szögben (10-15 fokban a felülettől mérve) készíthetők furatok.”

A lézeres fúrás lézerre vonatkozó követelményei [63]:

„• Jó fókuszhálthatóság, azaz kis fókuszfoktátmérő – kis furatátmérő érhető el így,

- Kisnyalábminőségi tényező - hengeres furatokhoz és kis megömlött réteghez,
- Nagy impulzus-átlagteljesítmény - gyors anyageltávolítás érhető el vele,
- Nagy impulzus csúcsteljesítmény ps és fs impulzus idejű lézereknél - a nagy anyageltávolítási sebességhez, keskeny megömlött réteghez és kis szögű kúposodáshoz.”

Egy érdekes alkalmazás: a nagy utasszállító repülőgépek üzemanyag-fogyasztásának csökkentése érdekében a hibrid lamináris áramlásszabályozás kulcsfontosságú technológia. A légellenállás csökkentéséhez több millió $50\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjű furatra van szükség a titánlemezek elülső felületein. A furatokon keresztüli levegő elszívás lamináris áramlást hoz létre a szárnyak élein. A folyamathoz használt rendszer Q-kapcsolt szállézer repülőoptikával és galvanométerben alkalmazotthoz hasonló szkennelővel. [64]

Ebben az értekezésben az egyimpulzusos fűrást vizsgálom, amely eljárással fémbe munkált furatokkal létre lehet hozni szűrőket, maszkokat [5], üvegszálak csatlakozóit [8].

7 A KUTATÓMUNKA ISMERTETÉSE

7.1 A kísérletekhez használt Corina lézerrendszer ismertetése

Az Nd:YAG lézer működését és felépítését Buza Gábor könyve tartalmazza [9]

Most vizsgáljuk meg a Corina lézerrendszer felépítését (10. ábra), melyet sztentgyártásra fejlesztett ki a Minvasive Kft. A rendszer alapja a LASAG KLS-246 típusú, villanólámpával gerjesztett, Nd:YAG rudat tartalmazó impulzusos üzemű lézer. A rezonátor hűtését vízkeringtetés biztosítja. A lézer egy sztereómikroszkópot is magába foglal lézersugárzás szűrőkkel, ami a megmunkálás megfigyelését teszi lehetővé. A munkadarab pozicionálását a fix függőleges fókuszált nyalábhoz képest Aerotech-mozgatórendszerrel oldották meg, mely a vízszintes síkban X-Y tengelyek mentén történő mozgatást, és egy vízszintes tengely körüli forgatást tesz lehetővé. A minimális súrlódás és nagy beállási pontosság érdekében ez a rendszer légcsapágyazást használ, így ennek táplálásához kompresszorra is szükség van. A Minvasive Kft. a lézer és a mozgatórendszer összehangolt működtetésére saját szoftvert fejlesztett Cut-control néven. A BME-n doktoranduszként ezen a lézerrendszeren tudtam kísérletezni, mivel témavezetőm, Dobránszky János az Anyagtudomány és Technológia Tanszéken dolgozott, ahol ez a lézer működött.



10. ábra
A Corina vágórendszer

7.2 A kísérletekhez használt szállézer rendszer ismertetése

Az szállézer működését és felépítését Buza Gábor könyve tartalmazza [9]. Anyagmegmunkáló szállézereknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást, ahol lézerdiodák adják át az energiájukat a nyitó és zárótükör funkcióját ellátó, Bragg-rácscsal felszerelt, gerjesztett optikai szálnak. Innen a nyalábtovábbító optikai szállal viszik el a sugárzást a fókuszálófejhez. Jelen értekezésben a mikromegmunkálás terén alkalmazott szállézereket elemzem.

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 kollimátorlencse, ezt követheti egy nyalábtágító, és egy 45°-os tükör, mely függőleges irányba tereli a lézersugárzást. Ezt követi a fókuszálólencse, mely a munkadarabra fókuszálja a nyalábot. A fix függőleges (z-koordinátájú) fókuszált nyalábhöz képest, a munkadarab-pozícionáló rendszer erre merőleges x-y síkban végez mozgást. A felhasznált mennyiségeket, jelöléseket és mértékegységüket a 21. táblázat tartalmazza a mikromegmunkálásnál használatos mértékegységeket alkalmazva. A formai követelmények miatt az előbb említett táblázat az értekezés végén helyezkedik el. Bár a hullámhosszt nanométerben szokták megadni, az (1) és (2) képletben akkor adódik ki a mikrométer mértékegység, ha a hullámhosszt is mikrométerben helyettesítem 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 4. táblázat tartalmazza. Fontos lehet még a szállézer impulzusalakja, mely a szállézer helyszíni bemérése alapján (11. ábra) négyszögimpulzus. Hasonló impulzuslefutást adott az 1 ms, 100 Hz, és a 10 ms, 10 Hz beállításkomináció. Szintén a BME-n keresztül ehhez a lézerhez fértem hozzá.

	TEST RESULTS YTTERBIUM FIBER LASER MODEL YLR-150/1500-QCW-AC S/N 13011023	Form: 38437 Revision: 04 Page: 4 of 5
---	--	---

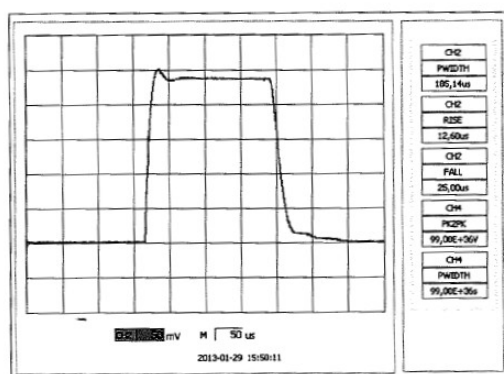


Fig. 4 Pulsed mode: laser output signal at $\tau = 0.2$ ms, $f = 500$ Hz (10% duty cycle)

11. ábra

A szállézer helyszíni bemérésén felvett négyszögimpulzus, impulzusos üzemmód, 0,2 ms impulzusidő, 500 Hz impulzusfrekvencia

	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
Nyalábminőségi 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 impulzus-átlagteljesítmény	0,6	1,5	kW

4. táblázat

A két lézer paramétereinek összehasonlítása

7.3 A felhasznált anyagok: ausztenites acél, réz, ezüst tulajdonságainak jellemzése

7.3.1 Az optikai tulajdonságok összehasonlítása

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 (29)[54]:

$$P_{\delta} = P_r + P_a + P_t \quad (24)$$

Itt P_{δ} 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 $P_{\delta} = 1$, akkor P_a az abszorpciós tényező, P_r a reflexiós tényező adott anyagra és adott hullámhosszra vonatkozóan. Az 5. táblázat mutatja az általam megmunkált anyagok Abszorpció (A) és Reflexió (R%) adatai a lézer hullámhosszához 1064 nanométeres hullámhosszon és szobahőmérsékleten a táblázatban jelölt szakirodalmak alapján. Az előbb említett táblázatból leolvasható, hogy az ezüst és a vörösréz csak néhány százalék energiát abszorbeál, míg a rozsdamentes acél 31%-ot, ezek az értékek azonban hőmérsékletfüggőek. Tekintettel arra, hogy a LASAG Nd:YAG lézer 1064 nm-en, az IPG szállézer 1070 nm-en működik ezek az anyagokra vonatkozó optikai adatok használhatóak.

<i>Anyag</i>	<i>A (%)</i>	<i>R (%)</i>
<i>Rozsdamentes acél [65]</i>	<i>31</i>	<i>69%</i>
<i>Ezüst [5]</i>	<i>3</i>	<i>97%</i>
<i>Réz [5]</i>	<i>4</i>	<i>96%</i>

5. táblázat

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

Ebből következik, hogy nagy kihívást jelent a lézer hullámhosszán erős reflexiót mutató anyagok megmunkálása.

7.3.2 A felhasznált anyagok fizikai és kémiai tulajdonságai

A 6. táblázatból kiolvasható, hogy az ezüstnek a legnagyobb a sűrűsége, ami azt mutatja, hogy egységnyi térfogatú anyag eltávolításakor a gravitációs erő ennél az anyagnál a legnagyobb, ez segít az olvadt anyag eltávolításában. A fajhő hőmérsékletfüggő, csak szobahőmérsékleten adott a táblázatban, ezt az olvadásponttal együtt kell vizsgálni, a vasnak a legnagyobb a fajhője, és az olvadáspontja, tehát egy mól anyag olvadáspontig való melegítéséhez ennél az anyagnál kell a legtöbb energia. Az olvadáshő és forráshő oszlopában nincsenek nagy különbségek.

A hővezetési tényező adja a legnagyobb különbséget, ha a vas a referencia, a réz és az ezüst hővezetési tényezője nyolcszorosa a vasénak, tehát lézeres vágáskor vagy fűráskor egységnyi időre és távolságra számolva 1 kelvin változás esetén ennyi energia vezetődik el az anyagba.

Levonhatom azt a következtetést, hogy a nagy reflexió és a nagy hővezetési tényező teszi együtt a rezet és az ezüstöt nehezen megmunkálhatóvá a lézerek hullámhosszán. Ez 1064 nm az Nd:YAG lézerre vonatkoztatva, 1070 nm az itterbium egymódusú szállézerre vonatkoztatva).

<i>Vegyjel</i>		<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Ag</i>	<i>Adat for- rása</i>
<i>Mennyiség</i>	<i>Mértékegység</i>				
<i>Rendszám</i>		26	29	47	[66]
<i>Atomtömeg</i>	<i>g/mol</i>	55,85	63,55	107,87	[66]
<i>Sűrűség</i>	<i>g/cm³</i>	7,884	8,96	10,49	[66]
<i>Fajhő**</i>	<i>J/(kg·K)</i>	449	384,4	235	[66]
<i>Olvadáshő</i>	<i>kJ/mol</i>	13,8	13,1	11,3	[66]
<i>Forráshő</i>	<i>kJ/mol</i>	347	300	255	[66]
<i>Olvadáspont</i>	<i>°C</i>	1538	1084,6	961,78	[66]
<i>Forráspont</i>	<i>°C</i>	2861	2562	2162	[66]
<i>Hőkapacitás**</i>	<i>J/(kg·K)</i>	450	386,4	236,1	[67]
<i>Hővezetési tényező**</i>	<i>J/(s·m·K)</i>	50,2*	385	406	[67]
<i>Hővezető képesség</i>	<i>W/(mK)</i>	80	400	430	[66]
* Acélra vonatkozik, ** Hőmérsékletfüggő, szobahőmérsékleten adott					

6. táblázat

A felhasznált anyagok periódusos rendszerbeli és termodinamikai tulajdonságai

Most nézzünk egy elemzést egy egydimenziós modell alapján egy mértékadó szakirodalom szerint [5]: a (25) képlet megadja, hogy az adott anyagban milyen d távolságra csökken le a hőmérséklet $1/e$ -ed részére, vagyis 37%-ára a hővezetés figyelembevételével. A számoláshoz a k termikus diffuzivitás anyagfüggő értékeit, melyet a 7. táblázat tartalmaz ugyanebből a szakirodalomból vettem [5]. A számításhoz 0,2 ms, vagyis 0,0002 s impulzusidőt vettem figyelembe, mely impulzusidőt az egyik fúrási kísérletemnél alkalmaztam [MGY4]. A számítás eredményeit a 7. táblázat utolsó két oszlopa tartalmazza.

<i>Fém</i>	<i>Termikus diffuzivitás (k)</i> [5]	<i>Behatolási mélység</i> (d)	<i>Behatolási mélység</i> (d)
	<i>cm²/s</i>	<i>cm</i>	<i>mikrométer</i>
<i>Ezüst</i>	<i>1,7</i>	<i>0,03687</i>	<i>369</i>
<i>Tiszta réz</i>	<i>1,14</i>	<i>0,03019</i>	<i>302</i>
<i>1.4301</i>	<i>0,056</i>	<i>0,00669</i>	<i>67</i>

7. táblázat Termális diffúzitási adatok, és behatolási mélység

A 7. táblázatból látszik, hogy az így definiált behatolási mélység a tiszta réznél 4,5-szöröse, az ezüsthöz 5,5-szöröse az acélénak. Ez is azt mutatja, hogy az utóbbi kettő lézerrel nehezen megmunkálható anyag.

$$d = 2\sqrt{kt_i} \quad (25)$$

A fóliafúrási kísérletekhez 50 mikrométer vastag vörösréz fóliát, 150 mikrométer vastag ezüst fóliát használtam a 20 mikrométer vastag rozsdamentes acél fólia mellett.

A 2019-ben a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén végzett EDS anyagösszetétel vizsgálat alapján a fólia tiszta réz volt. EDS-el megvizsgálták az ezüsthöz is, melyre a 8. táblázatban látható összetételt kapták. A rozsdamentes acél fólia 1.4301 típusú ausztenites korrózióálló acélból készült.

Elem	Tömegrészarány, %
Ag	89,70
Cu	10,30

8. táblázat Ezüsthöz összetétele

7.3.3 A kísérletekhez használt ausztenites acél jellemzése

Jelen dolgozatban acélfólia fűrészához és sztentgyártási csövek vágásához ausztenites rozsdamentes acél anyagúakat használtam, így most ezeket ismertetem, fémek közül ezekből az anyagokból készítenek legtöbbször sztentet. „Alaptípusuk a 0,1% C-, 18,5% Cr, 8,5% Ni-tartalmú 1.4319-es biokompatibilis anyagként való alkalmazása széles körű. Orvosi tűk, injekciós tűk, vérvételi lándzsák, katéterek, vezetődrotok, rugók anyagaként elterjedten használják az olcsósága mellett azért is, mert a szilárdsága – a nagyobb széntartalomnak köszönhetően – meghaladja az 1.4301 és az 1.4306 típusokét. Az ausztenites acélok bioösszeférhetősége 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.” [57]

„Az orvosi gyakorlatban az ausztenites acélok az implantátumok anyagaiként a Mo-ötvöztetésű 1.4571-es típussal kezdődnek. biokompatibilis anyagként felhasznált típusokat vákuumos átolvasztással kezelik, (1.4441) mely extra kis C-tartalmú, 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 1.4441 acélt a hagyományos implantátumanyagok vezetőjévé.” [57]

„A definíció igényével: a biokompatibilis anyag az orvosi eszközökben használt olyan élettelen anyag, amely ki van téve a biológiai rendszerrel való kölcsönhatásnak. Elméletileg minden anyagot biokompatibilis anyagnak tekinthetünk, amelynek valamilyen orvosi alkalmazásban szerep jut. Az élő szervezettel való kölcsönhatások minősítésére vezettek be egy, a biokompatibilis anyagok vonatkozásában alapvető fontosságú fogalmat: ez a biokompatibilitás.” [57]

Magyarországon az MSZ EN ISO 25539-es szabványsorozat [68] és az MSZ EN ISO 7198:2017 [69] foglalja össze az endovaskuláris (érbe helyezett) eszközök – protézisek, értágítók, szűrők, graftok – előírásait. [57]

7.4 A kísérletek kiértékeléséhez használt mikroszkópok és képelemző programok

A BME Anyagtudományi Tanszéken használt mikroszkópok:

- Nikon SMZ-2 típusú, digitális kamerával felszerelt sztereómikroszkóp,
- 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.

8 SZTENTGYÁRTÁSI CSÖVEK VÁGÁSI KÍSÉRLETEI SZAKIRODALMI ELEMZÉSEL

8.1 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 9. táblázatban dőlt és vastag karakterrel szerepeltetem. Fontos még az, hogy mennyit mozdul el a munkadarab a lézerhez képest az impulzusidő alatt, ezt a (26) képletből s -ként kapjuk meg, mivel az impulzusidő milliszekundumban adott és a vágási sebesség mm/s-ban, ezért a relatív elmozdulást mikrométerben kapjuk. Ezt összevetve a fókuszfoltátmérővel megvizsgálhatjuk, hogy mennyire torzul ellipszissé a hatásfolt. Ezt a fejezetet az [MGY4] [MGY5] [MGY6] publikációim alapján írtam.

$$s = t_i v \quad (26)$$

Hiányzó adatok kiszámolása Kathuria 2005 [70] cikkében a második beállításnál a (18) [46] egyenlet alapján ha elosztjuk a 80 mJ-os impulzusenergiát a 0,1 ms-os impulzusidővel, akkor 800 W impulzus-átlagteljesítményt kapunk. Ez után a vágási sebességet elosztjuk az impulzusfrekvenciával, akkor 5,67 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra a (17) egyenlet szerint, az eredmény a 9. táblázat 4. oszlopában szerepel, itt a falvastagság 100 mikrométer. Viszont Kathuria 2005 [70] cikkében az első beállításnál kevesebb, mint tizedrésze az impulzusenergia, az impulzusidő viszont a fele, így csak 130 wattot kapunk az impulzus-átlagteljesítményre, a két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság 1,17 mikrométer lesz a (17). egyenlet szerint, tekintettel a nagy 1 kHz-es impulzusfrekvenciára. A kiszámolt értékek a 9. táblázatban vastagon szedve vannak. Ezekben a cikkekben nincs megadva a vágási rés szélesség, így nem tudok egységnyi térfogatra jutó energiát számolni. Ezekben a cikkekben a lézerrel vágott sztent 1.4404 anyagból készült.

A 7. 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. A (22). egyenletből kiszámítható a fókuszfoltátfedés 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 átfúrní az anyagot, akkor nagyobb átfedés kell, a korábbi elemzésem alapján.

	Mérték- egység	<i>Kathuria 1</i> 2005 [70]	<i>Kathuria 2</i> 2005 [70]	<i>Nagy-1,</i> 2013 [71]	<i>Nagy-2,</i> 2013 [71]
<i>Anyag</i>		<i>1.4404</i>	<i>1.4404</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>	9,6	9,0
<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>Impulzus-átlagteljesít- mény</i>	<i>W</i>	130	800	160	150
<i>Impulzusfrekvencia</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>Két szomszédos impul- zusnyom középpontja közötti távolság az anyagon</i>	μm	1,17	5,67	2,50	3,33
<i>Fókuszfoltátmérő</i>	μm	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>24,00</i>	<i>24,00</i>
<i>Fókuszfoltátfedés</i>	<i>%</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	89,58	86,11
<i>A munkadarab elmoz- dulása az impulzusidő alatt</i>	μm	0,059	0,017	0,150	0,200
<i>Rayleigh-hossz</i>	μm	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	60	60

9. táblázat Nd:YAG lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel vannak szedve

Nagy 2013-as [71] cikkében nézzük először az 1. beállítást: az átlagteljesítmény az 16. egyenletből 9,6 W-ra adódik, ha elosztjuk a 2,4 mJ-os impulzusenergiát a 0,015 ms-os impulzusidővel, akkor 160 W impulzus-átlagteljesítményt kapunk. Ez után a (17). egyenletet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor 2,5 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra.

Nagy 2013-as [71] 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 impulzus-átlagteljesítményt kapunk. Ez után a (17)-t D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor 3,3 mikrométert kapunk impulzusok közti távolságra.

Ha most a 9. 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.

8.2 A szakirodalomban található szállézeres sztentvágás adatainak elemzése

	Mértékegység	<i>Kleine legjobb beállítás, 2002 [38]</i>	<i>Meng 2009 [39]</i>	<i>Muhammad jó 2010 [72]</i>	<i>Chen 2012 [50]</i>	<i>Chen 2013 [73]</i>	<i>Catalano 2017 [37]</i>
<i>Anyag</i>		<i>1.4404</i>	<i>1.4404</i>	<i>1.4404</i>	<i>1.4441</i>	<i>1.4441</i>	<i>1.4404</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>Impulzus-átlagteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>30</i>	<i>31</i>	<i>100</i>	<i>6</i>	<i>552</i>	<i>1760</i>
<i>Impulzusfrekvencia</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>Két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti 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>Fókuszfoltátfedés</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>A munkadarab elmozdulása az impulzusidő alatt</i>	μm	<i>0,400</i>	<i>1,200</i>	<i>1,670</i>	<i>1,400</i>	<i>0,084</i>	<i>0,001</i>
<i>Egységnyi térfogra 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>

10. táblázat

Szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel vannak szedve (n.a. = nincs adat)

Most elemezzük a szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 10. táblázatban adtam meg dőlt és vastag karakterrel szedve. A Rayleigh-hosszokat a 1. táblázatból vettem át, az ott leírtak alapján. Kleine, 2002 [38] cikkében szereplő adatokkal a kísérletéhez tartozó Rayleigh-hossz kiszámítható és 160 mikrométerre adódik. Kleine 2002 [38] cikkében az ideális lézerbeállítást vettem alapul. Az átlagteljesítmény az (16) [54] 1,5 W-ra adódik, a (18) [46] alapján ha a 30 W-os impulzus-átlagteljesítményt megszorozzuk a 0,1 ms-os impulzusidővel, akkor 3,00 mJ impulzusenergiát kapunk. Ezt a fejezetet az [MGY4] [MGY5] [MGY6] publikációim alapján írtam.

Meng 2009 [39] cikkében a 1. egyenlet alapján ha a 7,0 W-os átlagteljesítményt elosztjuk az 1,5 kHz-es impulzusfrekvenciával, akkor 4,67 mJ-os impulzus-átlagteljesítményt kapunk, majd a (18) [46] alapján, ha a 4,67 mJ-os impulzusenergiát elosztjuk a 0,15 ms-os impulzusidővel, akkor 31 W-os impulzus-átlagteljesítményt kapunk.

Muhammad 2010 [72] 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 megismételjük a Meng 2009 [39] cikkének elemzésekor leírt számításokat, akkor Chen 2012 [50], Chen 2013 [73] és Catalano 2017 [37] cikkéből megkapjuk az impulzusenergiát és impulzus-átlagteljesítményt, melyek a 10. táblázatban szerepelnek.

Most elemezzük tovább soronként a szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 10. táblázatban adtam meg dőlt és vastag karakterrel szedve: a (17). egyenletet D_{BT} -re rendezve a vágási sebességet elosztjuk a frekvenciával, akkor mikrométerben megkapjuk az impulzusok közti távolságot. A (22).egyenletből kiszámítható a fókuszfoltátfedés mind a hat megmunkálásnál, melyek a 10. táblázat 10. és 11. sorában szerepelnek.

Az egységnyi térfogatra jutó energia a vágási rés keresztmetszet szélesség alapján – mely csak az első négy cikkben adott a (23). egyenletből számolható ki, ezek a 10. táblázat 14. és 15. sorában szerepelnek. A behelyettesítéseket a (27). és a (28). egyenlet mutatja.

$$E_V = \frac{3 \text{ mJ} \cdot 1000 \text{ } \mu\text{m}}{8 \text{ } \mu\text{m} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 100 \text{ } \mu\text{m} \cdot \frac{19 \text{ } \mu\text{m}}{1000}} = 197 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \quad (27)$$

$$E_V = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot 1 \text{ mm}}{8 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 0,1 \text{ mm} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ mm}} = 197 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \quad (28)$$

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

- A legkisebb átlagteljesítménnyel Kleine 2002 [38] tudott sztentet vágni.
- Catalano 2017 [37] a nagyon rövid impulzusidő miatt ablációval, tehát párologtatással vágott, itt nagy fókuszfoltátfedés kellett: 99,65%, és emiatt a legkisebb a vágási sebesség: 2 mm/s.
- Chen 2012 [50] 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 fókuszfoltátfedés elegendő volt a vágáshoz.

8.3 Az ultrarövid: ps-os és fs-os impulzusidőt használó lézerekről szóló cikkek elemzése

Most elemezzük az ultrarövid lézerimpulzusokat használó sztentgyártásra használt lézerek kiszámolt hiányzó adatait, melyeket a 11. táblázatban adtam meg dőlt és vastag 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 [46] használt Trumpf TruMicro 5350 lézernél a legkisebb a fókuszfoltátmérője, mely annak köszönhető, hogy a hullámhossza harmada a megszokott szál- vagy Nd:YAG lézerekének, a (4). egyenletből 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 ns-tól 100 fs-ig terjednek. A 12. táblázatban a megmunkálás adatait elemeztem, itt csak azokat a cikkeket tudtam analizálni, amiben volt adat az elemzéshez, így kissé mások a cikkek, mint a 11. táblázatban szereplők. A 12. 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. Demir 2014-ben írt cikkéből [56] a

Rayleigh-hosszat tudtam kiszámolni. Ezt a fejezetet az [MGY4] [MGY5] [MGY6] publikációim alapján írtam.

Szerző, publikáció	Muhammad 2012 [46]	Muhammad 2012 [46]	Demir 2014 [56]	Demir 2014 [56]	Catalano, 2017 [37]
Lézerrendszer	Trumpf Tru-Micro 5350	Coherent Libra Ti: Sapphire	IPG YLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer	Rofin Star-Femto, Fiber optic	IPG YLP-1/100/50/50 Q-kapcsolt szállézer
d_0 (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.
Impulzusidő	6 ps	100 fs	250 ns	800 fs	250 ns
Impulzusidő (ms)	$6,00 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$8,00 \cdot 10^{-10}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$

11. táblázat

A sztentgyártásra használt ultrarövid impulzus idejű lézernyalábok jellemzői

A 12. táblázatban a publikációkból hiányzó, itt kiszámolt adatokat dőlt és vastag karakterrel tüntettem fel, kiszámításuk módja azonos a korábban ismertetettekkel. Muhammad 2012 [46] PhD értekezésében megvizsgálja a sztent lézeres vágása közben a cső munkadarabon átvezetett víz hatását: a hűtővíz miatt itt is kicsi lesz a vágási sebesség, de a salak nem tapad rá sem a vágás alá, 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 kHz–200 kHz-es értékek vannak itt. A fókuszfoltátfedés mindenhol 98% feletti, a két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság az anyagon Muhammad értekezésében van hogy 2 nanométer körüli, [46] ld. 12. táblázat első oszlopát.

A fentiekben bemutatott módszert – az impulzusos üzemű lézeres vágás publikációkból hiányzó adatainak kiszámítását beépítettem a 2. tézisbe.

	Publikáció	Muham-mad 2012 [46]	Muham-mad 2012 [46]	Muham-mad 2012 [46]	Demir 2014 [56]	Catalano 2017 [37]
	Lézer-berendezés	Trumpf TruMicro 5350		Coherent Libra Ti: Sapphire	IPG YLP-1/100/50/50 fiber Q kapcsolt	
Anyag, mértékegység		nitinol	Pt-Cr-ötvö-zésű acél	nitinol	AZ31 magnézium ötvözet	1.4404
Falvastagság	μm	280	67	180	200	200
Átlagteljesítmény	W	10	7	1	7,5	11
Impulzusidő	ms	$6,00 \cdot 10^{-9}$	$6,00 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$
Impulzusenergia	mJ	0,05	0,04	1	0,3	0,44
Impulzus csúcsteljesítmény	W	$8,33 \cdot 10^6$	$5,83 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,20 \cdot 10^3$	1760,00
Impulzusfrekvencia	Hz	200000	200000	1000	25000	25000
Vágási sebesség	mm/s	0,42	1,67	1,5	2	2
Két szomszédos impulzusnyom közép-pontja közötti távolság az anyagon	μm	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$8,35 \cdot 10^{-3}$	1,5	$8,00 \cdot 10^{-2}$	0,08
Fókuszfoltátmérő	μm	5,2	5,2	100	23	23
Fókuszfoltátfedés	%	99,96	99,84	98,50	99,65	99,65
A munkadarab elmozdulása az impulzusidő alatt	μm	$2,52 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$
Rayleigh-hossz	μm			1667	195	230
Hányszor kell átmenni a vágási vonalon		3	3	15–297		
A vágási minőség jellemzője		Salakmentes	Salakmentes			

12. táblázat Ultrarövid impulzus idejű lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel szedve

9 AZ Nd:YAG LÉZERES SZTENTGYÁRTÁSI CSÖVEKEN VÉGZETT VÁGÁSI KÍSÉRLETEK ADATAINAK ELEM- ZÉSE

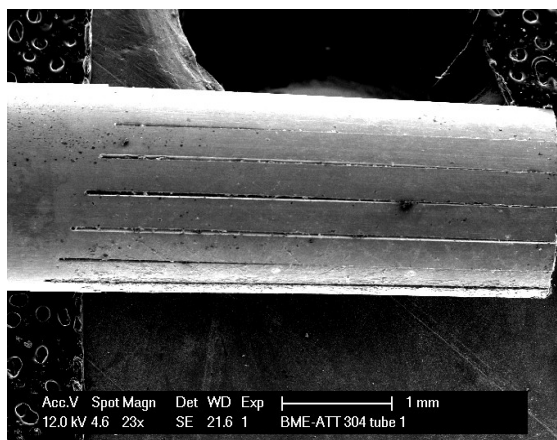
Most a korábbi kísérletemben [MGY13] szereplő adatokat elemzem tovább. Az 1. egyenlet alapján ha elosztjuk a 8 mJ-os impulzusenergiát a 0,02 ms-os impulzusidővel, akkor 400 W impulzus-átlagteljesítményt kapunk. A kísérletekben a lézerbeállítások azonosak voltak, csak a vágási sebességet változtattam, így a 13. táblázat két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság sora a (17), a fókuszfoltátfedés a (21). egyenlet alapján számítható ki. A Rayleigh-hossza a [MGY7] publikációmban adtam becslést. A 13. táblázat tartalmazza a kiszámolt új adatokat dőlt és vastag karakterrel szedve.

		<i>Meszlényi et al 2008 [MGY13]</i>					
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<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>Impulzus-átlagteljesítmény</i>	<i>W</i>	<i>400</i>	<i>400</i>	<i>400</i>	<i>400</i>	<i>400</i>	<i>400</i>
<i>Impulzusfrekvencia</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>Két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság az anyagon</i>	μm	<i>1,00</i>	<i>2,00</i>	<i>3,00</i>	<i>4,00</i>	<i>6,00</i>	<i>10,00</i>
<i>Fókuszfoltátfedés</i>	<i>%</i>	<i>95,83</i>	<i>91,67</i>	<i>87,50</i>	<i>83,33</i>	<i>75,00</i>	<i>58,33</i>
<i>A munkadarab elmozdulása az impulzusidő alatt</i>	μm	<i>0,030</i>	<i>0,060</i>	<i>0,090</i>	<i>0,120</i>	<i>0,180</i>	<i>0,300</i>
<i>Rayleigh-hossz</i>	μm	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>

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

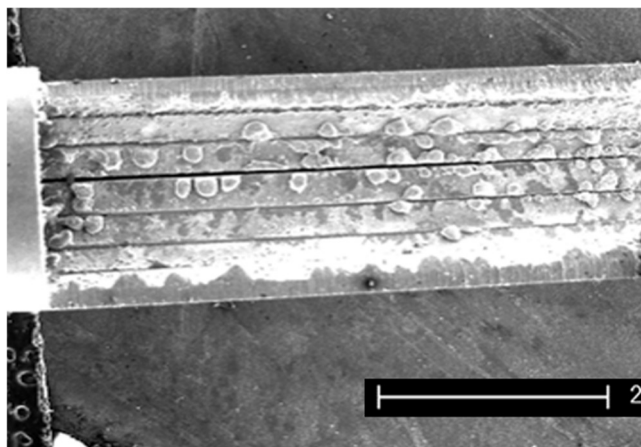
Ha most a táblázat adatait elemezzük, akkor nyilvánvaló, hogy a 15 mm/s-os maximálisan elérhető vágási sebesség a technológiai optimum, itt a legkisebb a fókuszfoltátfedés és legnagyobb az impulzusok közti távolság, ezért itt képződik a legkevesebb tapadósálak, ilyen nagy vágási sebesség az elemzett szakirodalomban impulzusos üzemi Nd:YAG lézeres sztent vágásoknál nem található. Az 12. ábra mutatja ezen kísérlet alatt vágott cső külső palástját, míg a

belső oldalon a salakképződést a 13. ábra. Az anyag 1.4306 rozsdamentes acél cső volt, a falvastagság 120 mikrométer.



12. 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.



13. 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

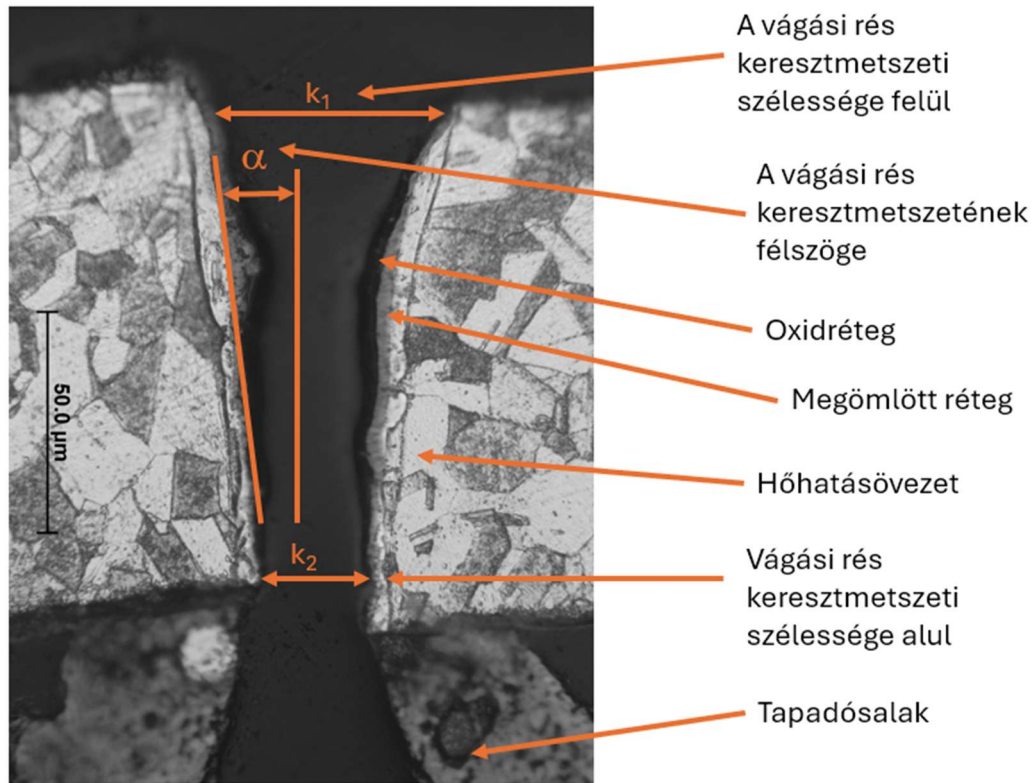
7 A VÁGÁSI MINŐSÉG ÉRTÉKELÉSE ÉS TERMÉKBIZTONSÁG A LÉZERES VÁGÁSSAL VÉGZETT SZTENTGYÁRTÁSNÁL

Egy korábbi publikációmban [MGY16] axiális irányban bevágott 1.4301 L anyagú csöveken a lézeres vágás keresztmetszetét elemeztem, amelyen a korai kísérlet miatt sok vágási hibát lehet szemléltetni. Ezt a fejezetet az [MGY6] publikációm alapján írtam. A vágási rés keresztmetszetét (14. ábra), (15. ábra) elemezve az alábbi vágási hibákat tudjuk azonosítani:

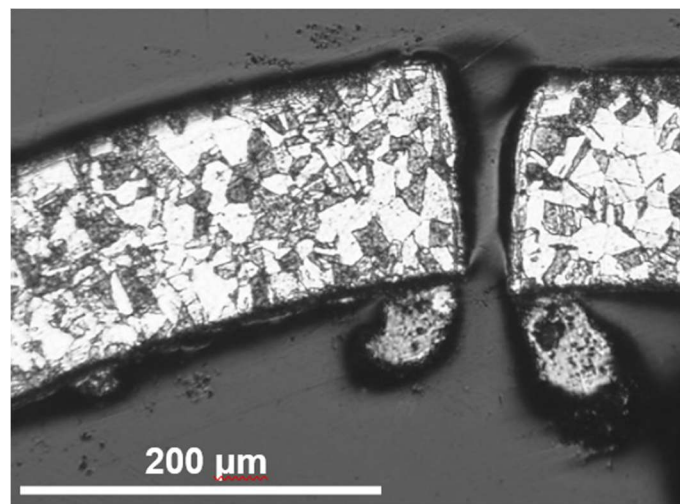
- Trapéz alakú vágási rés keresztmetszet, mely a vágási felület szögeltéréssel jellemezhető: (29). Itt α a félszög, k_1 a vágási rés szélessége fent, k_2 a vágási rés szélessége lent, a_v a falvastagság, a $\tan^{-1}$ -a tangens függvény inverze.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{k_1 - k_2}{2a_v} \right) \quad (29)[54]$$

- Oxidréteg az oxigénnel, mint munkagázzal gyorsított vágás miatt van fekete réteggént a vágási rés keresztmetszet külső peremén.
- Megömlött réteg, mely megolvastott, majd megszilárdult fémréteg a vágási rés keresztmetszetben.
- Hőhatásövezet: a megömlött 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 (15. 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.

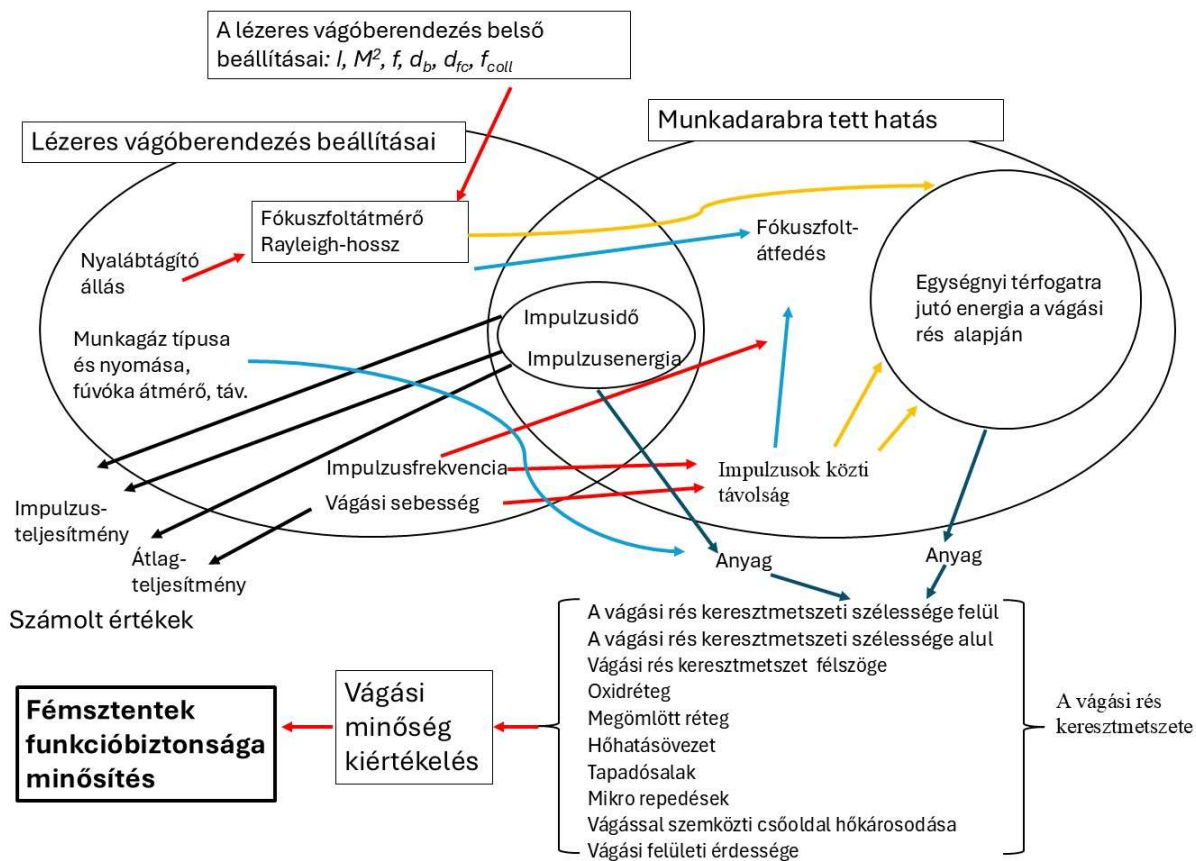


14. ábra
A vágási rés keresztmetszete 1,200 mm átmérőjű, 0,120 mm falvastagságú, 1.4306 anyagú rozsdamentes acél cső vágásakor



15. ábra
Tapadósalak a cső belső falán $D = 1,200$ mm, $v = 0,120$ mm, anyag: 1.4306 acél. A vágást a Corina sztentvágásra használt lézerberendezéssel végeztem

A lézeres sztentvágás technológiai paramétereinek összefüggését az 1. –14. egyenlet írja le, az egyes paraméterek egymásból való kiszámolhatóságát a 16. ábra mutatja. Ezzel olyan módszert dolgoztam ki, mely a teljes paraméterrendszer kiszámolhatóságát lehetővé teszi és szemlélteti.



16. ábra

Sztentek lézeres vágási paramétereinek összefüggései

Mindezek alapján egy átfogó értékelési rendszert dolgoztam ki a sztentek lézeres vágási hibáinak a sztent funkcionális biztonságára gyakorolt hatásaik erőssége szerint súlyozott értékelésével és rendszerezésével. Az így meghatározott funkcionális biztonsági hatástényezőknek az összegzésével értékelhető és minősíthető a sztentek lézeres vágásának minősége. A szóban forgó értékelési rendszer -- amely a technológiai és a funkcionális biztonsági szempontokat egyesítő mérnöki-szakértői rendszer -- összetevőit a 14. táblázat tartalmazza. A táblázatban a méreten alapuló dimenzió nélküli paramétereknél a fellépő lézeres vágási hiba nagyságát vettem alapul, amit egy referenciaértékkel osztottam. A súlyozás során kisebb súllyal vettem figyelembe az utómegmunkálásnál eltávolítható hibákat, nagyobb súllyal a maradandókat. Az utómegmunkálás lehet kémiai és elektrolitikus maratás, valamint mechanikai és elektrokémiai polírozás. Így definiáltam a funkcionális biztonsági vágásminőséget (FBVM), amely a funkcionális biztonsági hatástényezők (FBHT) összege, amelyek mindegyike pedig áll egy darab technológiai alapú hibaértékszámából és egy darab funkcióbiztonsági alapú súllyal.

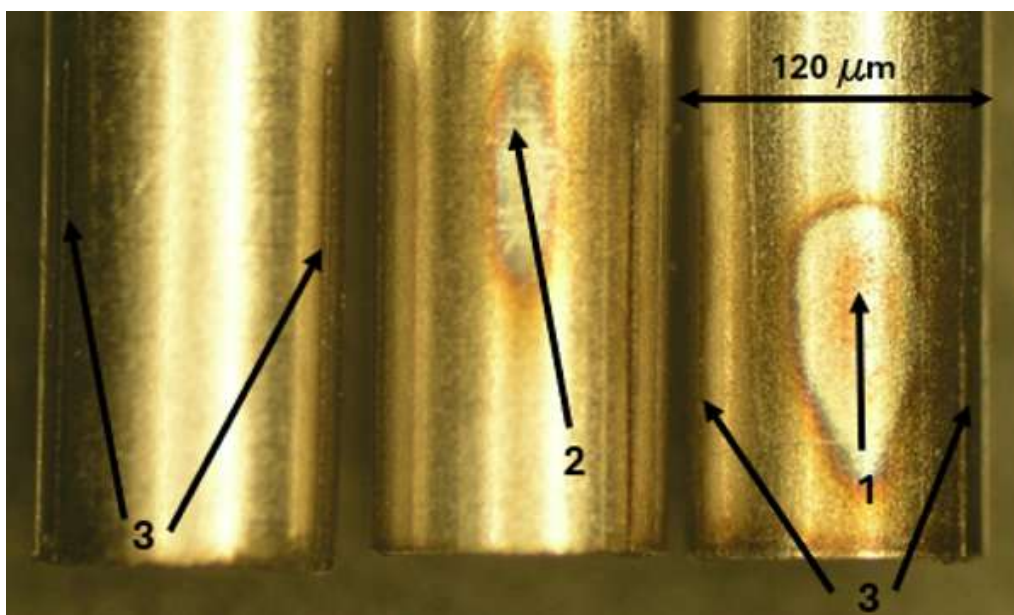
A funkcionális biztonsági vágásminőség értékelésekor úgy adtam meg az éppen elfogadható határt, hogy a 14. ábra és a 15. ábra képeivel szemléltetett vágási rés keresztmetszet ezt teljesítse. A lézerrel vágott cső nyalábbelépéssel szemközti oldalán bekövetkezett hőkárosodást a 17. ábra mutatja, amelyen látható, hogy a bal oldali cső vágási beállításai mellett nem figyelhető meg hőkárosodás.

<i>Vágási hiba</i>	<i>Méreten alapuló dimenzió nélküli paraméter</i>	<i>Súlyszám</i>	<i>FBHT</i>
<i>Hőhatásövezet szélessége, s_s, μm</i>	$H1 = s_s / 10 \mu m$	<i>0,5</i>	$H1 \cdot 0,5$
<i>Megömlött réteg vastagsága s_m, μm</i>	$H2 = s_m / 5 \mu m$	<i>0,5</i>	$H2 \cdot 0,5$
<i>Oxidréteg vastagsága, s_o, μm</i>	$H3 = s_o / 5 \mu m$	<i>0,5</i>	$H3 \cdot 0,5$
<i>Tapadósalak magassága, h_t, μm</i>	$H4 = h_t / 20 \mu m$	<i>0,5</i>	$H4 \cdot 0,5$
<i>A vágási rés keresztmetszetének félszöge, a°</i>	$H5 = a^\circ / 5^\circ$	<i>2</i>	$H5 \cdot 2$
<i>Mikrorepedések hosszúsága l_m, μm</i>	$H6 = l_m / 2 \mu m$	<i>0,5</i>	$H6 \cdot 0,5$
<i>Felületi érdesség, R_{max}, μm</i>	$H7 = R_{max} / 2 \mu m$	<i>0,1</i>	$H7 \cdot 0,1$
<i>A vágási rés keresztmetszeti szélessége fent, k_1, μm</i>	$H8 = k_1 / 20 \mu m$	<i>1</i>	$H8 \cdot 1$
<i>A vágási rés keresztmetszeti szélessége lent, k_2, μm</i>	$H9 = k_2 / 20 \mu m$	<i>0,5</i>	$H9 \cdot 0,5$
<i>Hőhatás szélessége a cső nyalábbelépéssel szemközti, belső oldalán, s_h, μm</i>	$H10 = s_h / 10 \mu m$	<i>3</i>	$H10 \cdot 3$
<i>Funkcionális biztonsági vágásminőség</i>			<i>0-3 kiváló, 4-6 jó 7-10 elfogadható 11-től nem elfogadható</i>

14. táblázat Szent vágási hibák értékelési rendszere

$$FBVM = H1 \cdot 0,5 + H2 \cdot 0,5 + H3 \cdot 0,5 + H4 \cdot 0,5 + H5 \cdot 2 + H6 \cdot 0,5 + H7 \cdot 0,1 + H8 + H9 \cdot 0,5 + H10 \cdot 3 \quad (30. \text{ egyenlet})$$

A funkcionális biztonsági vágásminőség (FBVM) képletét ezek után a 30. egyenlettel lehet felírni.



17. ábra

Termikus elszíneződés (hőkárosodás) csőnek a lézeres vágás nyalábbelépési helyével átellenes oldalának külső falán, 1 – Erős hőkárosodás, 2 – Gyenge hőkárosodás, 3 – Másik vágási vonalak,

Végül a 15. táblázat egy példát mutat a vágási minőség értékelésére, melyhez a 14. ábra és a 15. ábra alapján a JMicroVison mikroszkópos mérőszoftverrel végeztem sorozatméréseket. Az értékelés alapja a 14. táblázat, az értékelés eredménye a 9,03 dimenzió nélküli számmal jellemezhető funkcionális biztonsági vágásminőség, 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 munkagázként a vágás gyorsítására, de fokozódik emiatt az oxidréteg, megömlött réteg, hőhatásövezet, salak képződése. Úgy kell meghatározni a sztent bordaméretét, 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 tapadásalak mennyisége és a salak kifröccsenése is, így kevesebb utómegmunkálás kell, és a vágási sebesség is nagyobb lesz.

A fent bemutatott sztent vágás biztonsági elemzését bemutató módszer alkotja az 5. tézist.

Vágási hiba	Méreten alapuló dimenzió nélküli paraméter	Súly- szám	Mért ér- ték 1	Mért ér- ték 2	Mért ér- ték 3	Mért ér- tékek át- laga	FBHT
Hőhatásövezet szélessége, s_s , μm	$H1 = s_s / 10 \mu m$	0,5	3,2	2,5	3,2	3,0 μm	0,30
Megömlött réteg vastagsága s_m , μm	$H2 = s_m / 5 \mu m$	0,5	5,4	3,4	5,5	4,8 μm	0,48
Oxidréteg vastag- sága, s_o , μm	$H3 = s_o / 5 \mu m$	0,5	2,3	2,9	2,5	2,6 μm	0,26
Tapadósalak ma- gassága, h_t , μm	$H4 = h_t / 20 \mu m$	0,5	61	44	55	53,3 μm	1,33
A vágási rés ke- resztmetszetének félszöge, a°	$H5 = a^\circ / 5^\circ$	2	10	6	8	8°	3,20
Mikrorepedések hosszúsága l_m , μm	$H6 = l_m / 2 \mu m$	0,5	0	0	0	0 μm	0
Felületi érdesség, R_{max} , μm	$H7 = R_{max} / 2 \mu m$	0,1	4	5	3	4 μm	0,20
A vágási rés ke- resztmetszeti szé- lessége fent, k_1 , μm	$H8 = k_1 / 20 \mu m$	1	59	48	52	53 μm	2,65
A vágási rés ke- resztmetszeti szé- lessége lent, k_2 , μm	$H9 = k_2 / 20 \mu m$	0,5	24	26	24	24,67 μm	0,62
Hőhatás széles- sége a cső nya- lábbelépéssel szemközti, belső oldalán, s_h , μm	$H10 = s_h / 10 \mu m$	3	0	0	0	0 μm	0
Funkcionális biz- tonsági vágásmi- nőség							9,03
						Minősítés	Elfogad- ható

15. táblázat

Példa a vágási minőség értékelésére, Corina lézerrendszerrel, oxigén munkagázzal vágott
1.4306 rozsdamentes acél cső vágása, a falvastagság 120 mikrométer volt

8 AZ EGYIMPULZUSOS LÉZERES FÚRÁS FOLYAMA-TÁ- NAK ELEMZÉSE FÉMFÓLIÁK FÚRÁSÁNÁL

8.1 Kísérleti munka ausztenites acél fólia fúrásával

A kísérletekhez a korábban ismertetett Corina lézeres megmunkálórendszert használtam ld. 7.1 fejezet. A lézeres fúráshoz felhasznált Corina lézer működési diagramja, amiből a beállítások jobban megérthetőek az [74] publikációban találhatóak. Ezt a fejezetet az [MGY1] publikáció alapján írtam.

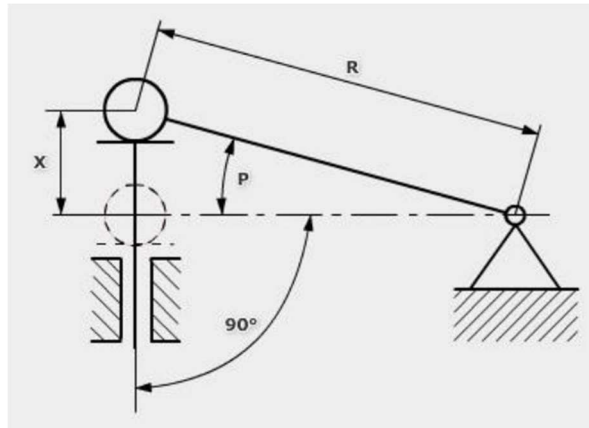
A kísérlet során állandó volt az anyag (1.4301 típusú ausztenites korrózióálló acél fólia), az anyagvastagság (0,02 mm), az impulzusidő (0,12 ms), a nyalábtágító állása (4-es szorzó a tágítatlan nyalábhoz képest). Változók voltak: a nitrogén munkagáz nyomása (2 és 5 bar), a lézerimpulzus energiája (10, 30, 50 mJ), a fókuszpozíció (a fókuszfolthoz képest $\pm 0,7$ mm z-koordináta között). Mivel az impulzusidőből és az impulzusenergiából származó impulzus-átlagteljesítmény is fontos, ezt a 16. táblázatban adom meg.

<i>Impulzusidő (ms)</i>	<i>Impulzusenergia (mJ)</i>	<i>Impulzus-átlag- teljesítmény (W)</i>
0,12	10	83
0,12	30	250
0,12	50	417

16. táblázat Ausztenites acélfólia fúrási kísérleténél soronként egy fúratsorozathoz tartozó impulzusadatok

A fóliába a különböző fókuszpozícióban egyetlen lézerimpulzus által fűrt furatok létrehozásához a szinuszmanipuláció [75], elvén működő fóliarögzítő készüléket terveztem (19. ábra), és gyártattam le, melynél a rögzített fólia ferdesége mérőhasábbal állítható.

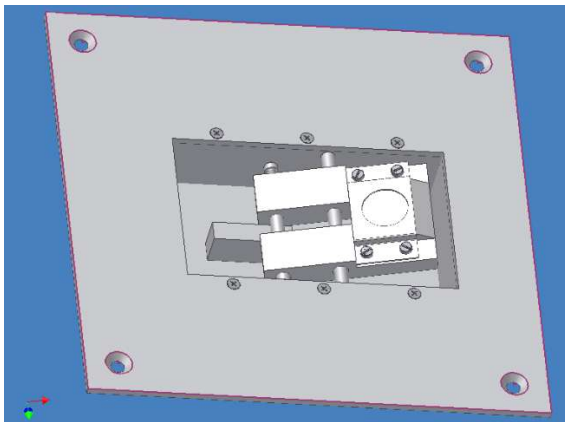
„Az emelőkaros mozgásoknak nagyon sok fajtája van, a régi műszertechnikában előszeretettel használták a karos mozgásokat, különösen előírt karakterisztikájú, nemlineáris mozgásfüggvények megvalósítására. Manapság az emelőkaros mozgások ritkábbak, de a két legfontosabb változatát fontos ismerni.” Az első a szinuszmanipuláció, aminek vázlatát a 18. ábra mutatja.” [75].



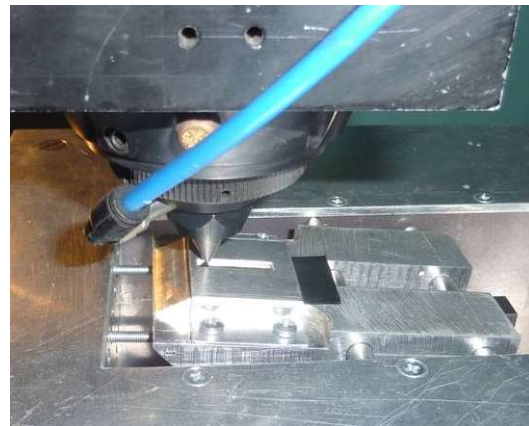
18. ábra
Szinuszméchanizmus [75]

$$X = R \sin P \quad (31)$$

Az emelőkar által leírt valódi mozgásfüggvényt a (31) egyenlet mutatja, itt R az emelő bázistávolsága, P az emelési szög, x a függőleges elmozdulás [75]. Az általam készített kísérleti eszköz R bázistávolsága 30 mm. 21,7 mm mérőhasáb-kombinációt kellett alátámasztásként betenni a mozgó henger alá, hogy a fólia vízszintes legyen.



19. ábra
A fóliarögzítő szerkezet modellje



20. ábra
A fóliarögzítő szerkezet a lézerfej alá, a munkadarab-mozgatórendszerre szerelve

A fóliarögzítő szerkezet közepére kör alakban rögzített fólia (19. ábra) a mérőórás vízszintmérés kis erőhatása alatt is behajlott, ezért valószínűleg a munkagáz nyomása alatt is behajlott volna. Ezért a kezdeti tervhez képest a fólia befogását egy 4 mm-es sávra korlátoztam. A másik változás az asztal két helyen történő, csavarorsós alátámasztása volt, azért, hogy az asztal ne süllyedjen le a munkagáz nyomása alatt (20. ábra) A csavarorsós alátámasztások, melyek egy

ferde felületre szorítanak rá, a fúvókától balra látszanak. A fóliarögzítő eszköz és az alább ismertetett kísérleti módszer adja az 1. tézist.

A kísérletsorozatban 5 bar, majd 2 bar nyomású N_2 munkagázzal (23. ábra) 0,02 mm-es rozsdamentes acél fólián (1.4301) felülről lefelé 50, 30, 10 mJ impulzusenergiával különböző fókuszokban furatokat készítettem. Egy furatsorban 60 db furatot hoztunk létre. A kísérleti beállítások dokumentálására adatlapokat használtam, amelyek az alábbi kísérleti feltételek mindegyikét rögzítik:

- Nd:YAG rudat a rezonátorban gerjesztő villanólámpa feszültsége, V
- impulzusfrekvencia, Hz
- impulzusidő, ms
- impulzusenergia, mJ
- impulzus-átlagteljesítmény, W
- a lézer átlagteljesítménye, W
- impulzusok közötti távolság, mm
- haladási sebesség, mm/s
- az álló lézerhez képesti munkadarab mozgatórendszer gyorsulása, mm/s^2
- munkagáz fajtája
- munkagáz nyomása, bar
- fúvókátávolság (az anyag felszínétől), mm
- a lézerfejen beállítható fókuszállás mm-ben
- nyalábtágító-állás: 4
- anyagminőség jele
- anyagvastagság, mm
- fóliarögzítő szerkezet mérőhasáb alátét, ebből fólia ferdesége, fok
- környezeti hőmérséklet, °C
- csóvaképződés megfigyelhető-e?

Az impulzusenergia Gauss-eloszlása elosztva azon területtel, amelyre szétoszlik, J/m^2 -ben ábrázolható a különböző függőleges síkokban. Ha ez elér egy $E_{\text{határ}}$ energiasűrűséget, ami az olvasztási határ az adott anyagra, akkor a Gauss-eloszlás és az $E_{\text{határ}}$ energiasűrűség metszéseként létrejönne az olvasztott furat átmérője, azonban 7.3.2-ban leírtak szerint a hővezetés miatt is megolvad anyag a fókuszfolt határán kívül, így nagyobbak lesznek a furatok annál, mint ami a 22. ábrából következne.

Az olvasztási átmérő az elvi ábrából leolvasható módon a fókusz síkjában a legkisebb, a fókuszsíktól távolodva nő, majd még jobban távolodva csökken, ez a kísérletekből is beigazolódott (23. ábra) A 22. 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, és a hővezetés hatása miatt már csak olvasztás történik, ezért a furatátmérőt olvasztási átmérőnek lehet nevezni.

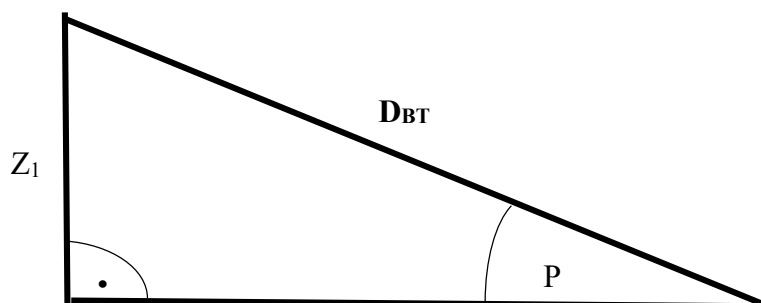
Az egy munkamenetben készült furatsornál csak relatív koordináták léteznek, mert a lézerhez képesti pozíciót nehéz meghatározni. A Z-koordinátatengely a lézersugárzás terjedési irányába esik. A furatok közül a lézerfejhez legközelebbit definiáltam nulla Z-koordinátájúnak. A 18. ábra alapján a kísérletnél használt 19 mm-es mérőhasáb magasságából az X emelés

$21,7 \text{ mm} - 19 \text{ mm} = 2,7 \text{ mm}$. ebből, és a 30 mm bázistávolságból 5,164 fok a fólia vízszintessel bezárt szöge (32) .

$$P = \arcsin \frac{2,7 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 5,164^\circ \quad (32)$$

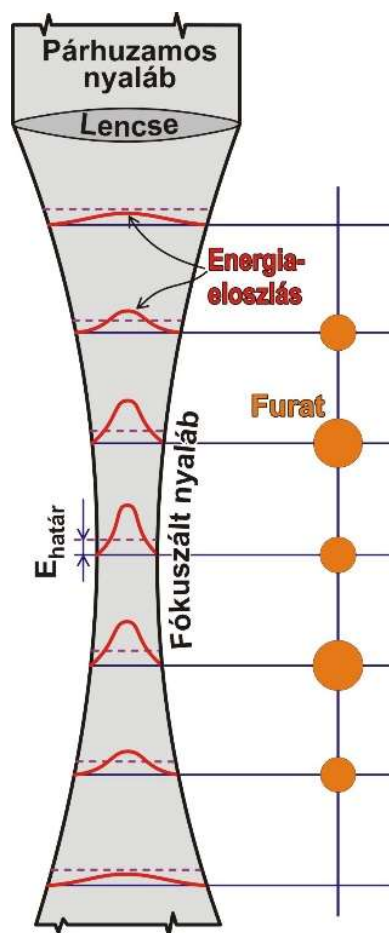
Mivel a kísérletnél a fólián mérhető impulzusok okozta elválkozás távolsága: D_{BT} 200 mikrométer volt, a 21. ábra alapján a (33). egyenletből $Z_1 = 18$ mikrométer adódik a két szomszédos furatközéppont közötti függőleges, azaz z-irányú magasságletérésre. A kísérleteket 4-es nyalábtágító-állásnál végeztem.

$$Z_1 = D_{BT} \sin P = 200 \mu\text{m} \sin 5,164^\circ = 18 \mu\text{m} \quad (33)$$



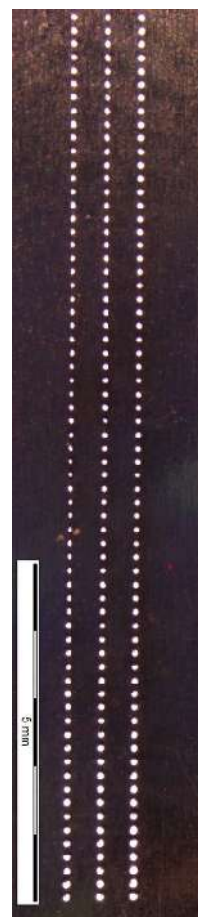
21. ábra
Két furatközéppont közötti Z_1 magasság származtatása

Ennél az Nd:YAG-lézernél a fólián mérhető impulzusok okozta elváltozás: D_{BT} távolságát fixen lehetett tartani az impulzusfrekvencia változtatásával: a munkadarab mozgató asztal induláskor kisebb sebességhez kisebb impulzusfrekvenciát lehetett beállítani, így a furatok távolsága állandó volt (ld. 23. ábra.)



22. ábra

A fókuszált lézernyaláb különböző vízszintes síkjaiban különböző méretű furatok jönnek létre



23. ábra

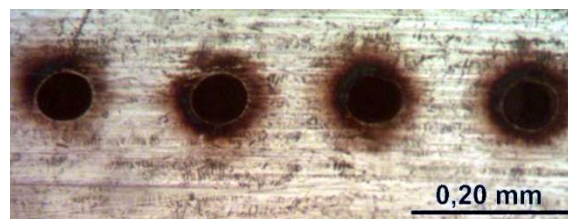
A második kísérletsorozatban, 2 bar nyomású N_2 munkagázzal készített furatsorozatok

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 tekintem és összevetem a fólia $5,164^\circ$ -os ferdesége miatti legnagyobb és legkisebb átmérő közötti különbséget, akkor 100 mikrométeres furatra alkalmazva ez elhanyagolható, 0,4%-os különbséget jelent. Ha az egy impulzussal készített furatok szakirodalomban közölt mikroszkópos képeit elemezzük, látható, hogy eltérnek az ideálistól. [76]. Milyen eltéréseket tapasztalunk az ideálistól, és mik az eltérések okai?

A kísérletek tapasztalatai

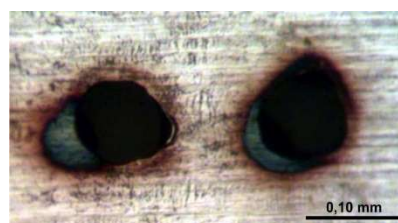
Fontos jellemzője a fúrásnak a hőhatásövezet megjelenése a furat körül, mely az anyag felületének elszíneződésében is tetten érhető (24. ábra). Ennek az az oka, hogy a lézernyaláb olvasztási átmérőn kívül eső részének egységnyi felületre eső energiatartalma még mindig jelentős egy adott körgyűrűn belül, valamint a hővezetés hatása. Különösen a fókuszolt környezetében figyelhető ez meg, ahol a legnagyobb az impulzusenergia koncentrációja. Ezzel kapcsolatban a következő megjegyzéseket tesszem:

- Ha oxigén munkagázt használunk, akkor a legbelső rétege a furatnak az oxidréteg.
- A furat falán lévő salakréteg alatt található a megömlött réteg, amely a lézernyaláb által megolvasztott és megszilárdult anyagréteg.
- Az alsó kilépő nyíláson általában nagyobb mennyiségű olvadt anyag rakódik le, ezt tapadósalaknak szokták nevezni, az MSZ EN ISO 17658:2015 [77] szabvány alapján.
- A nem kör alakú felső furatkontúr a lézernyaláb aszimmetriája, a megmunkálásnál fellépő csóvaképződés miatt alakul ki (25. ábra)
- Kúpos lesz a furat keresztmetszete, mert a megmunkált fólia felső részén több energia nyelődik el.
- Erős furatátmérő-ingadozás alakult ki a csóvaképződés miatt az elvi fókuszsíkból és az a feletti és az alatti tartományban.



24. ábra

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

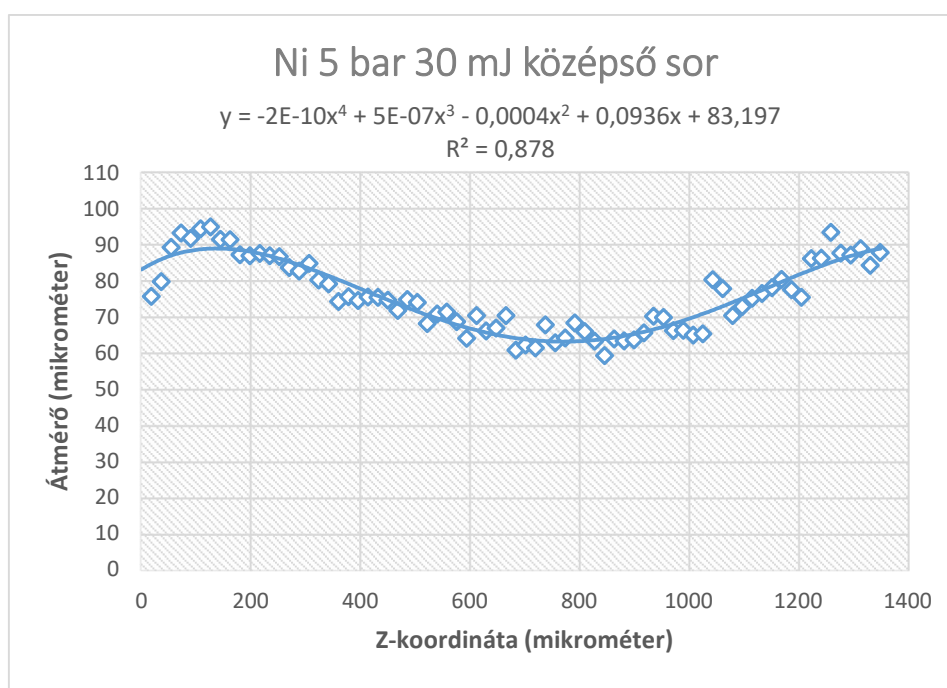


25. ábra

30 mJ impulzusenergiával készített furatsor vége: szabálytalan felső kontúrú furatok

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 fúrás-sal” végzett fúrással – szabályosabb furatokat lehet készíteni a szakirodalom szerint, de ilyenkor kisebb a termelékenység.

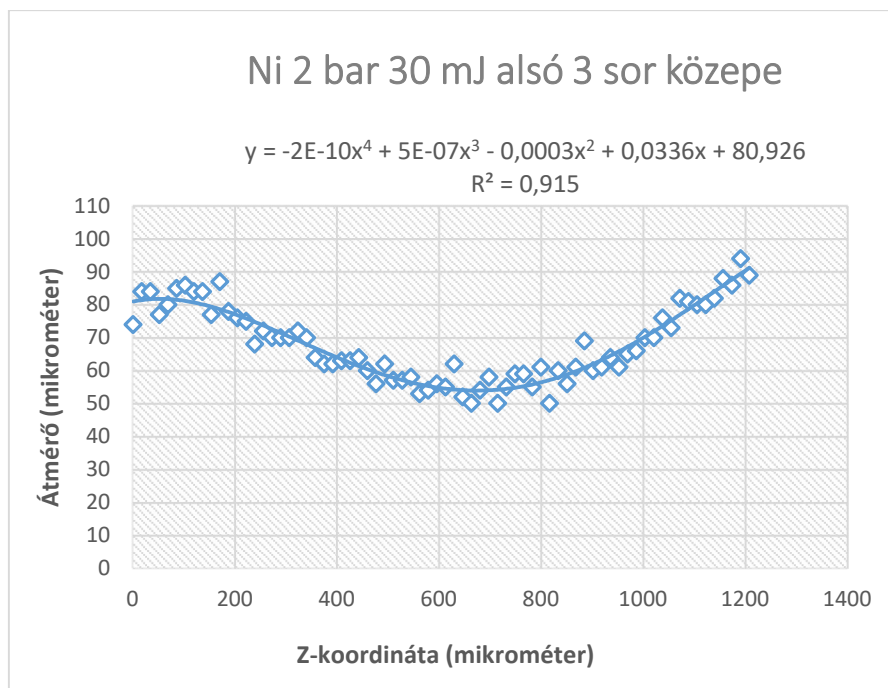
Most vizsgáljuk meg a furat olvasztási átmérője és a fókuszpozíció összefüggésének megismerésére irányuló kísérlet eredményeit.



26. ábra

5 bar nyomású nitrogén gázzal, 30 mJ energiával készített furatok felső lemezsíkon mért átmérője a Z koordináta függvényében

A 26. ábra mutatja 5 bar nitrogén munkagázt 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 furatátmérőkre illesztett trendvonal alja mindhárom függvényenél 64 mikrométer körüli, tehát a vizsgált tartományban az impulzusenergiának a furatok átmérőjére gyakorolt hatása elhanyagolható. Ennek az az oka, hogy az 5 bar nitrogén munkagáz nyomás elég nagy ahhoz, hogy a felületi feszültség ellenében az olvadt anyagot kipréselje a munkadarabból. Az olvadás részben a lézer által közvetlenül történik, részben hővezetés által.



27. ábra

2 bar nyomású N₂ gázzal, 30 mJ impulzusenergiával készített furatok felső lemezén mért átmérője a Z koordináta függvényében

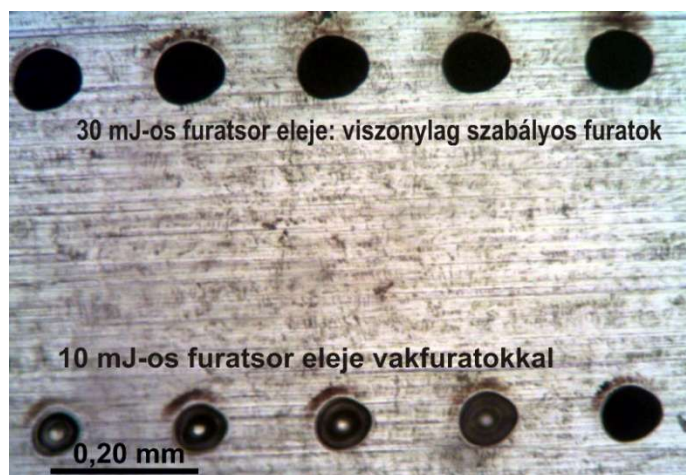
A kísérletekből kiderül, hogy 2 bar nyomású nitrogént használva minél nagyobb az impulzusenergia, annál nagyobbak a furatok. A mért furatokra illesztett trendvonal alja 50 mJ-nál 58 mikrométer, 30 mJ-nál 55 mikrométer, 10 mJ-nál 50 mikrométer körüli. A legnagyobb furat átmérője rendre 98, 90, 75 mikrométer, 50, 30, 10 mJ energiánál. A 26. ábra mutatja 2 bar nitrogén munkagázt használva, 30 mJ impulzusenergiával készített furatok fókuszpozíció-furat olvasztási átmérő függvényeit. A 22. ábráról megjósolható furatátmérő-csökkenés a 26. ábra és a 27. ábra bal oldalán a fűvókához közeli tartományban látszik. Itt a felületi feszültség megtartja az olvadék egy részét a gáznyomással szemben.

A 22. 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. 28. ábra). A 17. táblázat mutatja a munkagáz nyomásának és az impulzusenergiának hatását a furatátmérők szélsőértékeire.

<i>Munkagáz nyomása és az impulzusenergia</i>	<i>Furatátmérő minimuma (μm)</i>	<i>Furatátmérő maximuma (μm)</i>
<i>5 bar 10, 20, 30 mJ</i>	<i>64</i>	<i>90</i>
<i>2 bar 10 mJ</i>	<i>50</i>	<i>75</i>
<i>2 bar 30 mJ</i>	<i>55</i>	<i>90</i>
<i>2 bar 50 mJ</i>	<i>58</i>	<i>98</i>

17. táblázat

A munkagáz nyomásának és az impulzusenergiának hatása a furatátmérők szélsőértékeire



28. ábra

A 30 mJ és a 10 mJ impulzusenergiával készített furatsor eleje

Valószínűleg a csóvaképződés miatt a fókusz közelében és a fókuszálólencsétől távolabb (nagyobb Z koordinátájú helyeken) erősen ingadozik a furatátmérő. Kevésbé szórnak a furatátmérők a görbe első egynegyedénél, a 0–300 mikrométer tartományban lehet. Lássuk a furatgeometriákat: a 28. ábra szabályosabb kontúrú furatokat ábrázol. 2 bar nitrogén munkagázt használva 30 mJ impulzusenergiával készített furatok fókuszpozíció – furat olvasztási átmérő függvényét mutatja a 27. ábra.

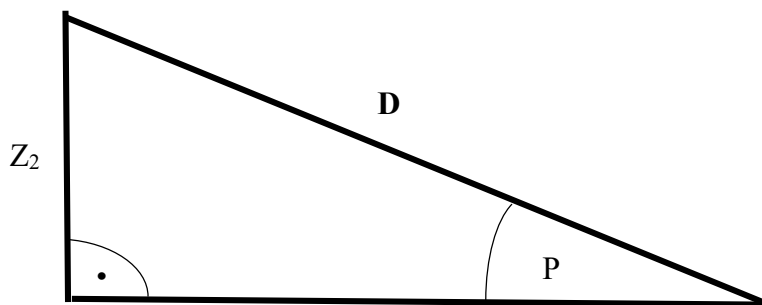
A kísérletek eredményeiből kitűnik, hogy a furatok ingadozó átmérőjűek. Ennek okait a következőkben látom:

- Az elpárologtatott anyag gőznyomása és a munkagáz kilöki az olvadt anyagot a furatból.
- Csóvaképződés figyelhető meg; a csóva nagy optikai sűrűségű ionizált gáz, mely a lézersugárzás jelentős részét abszorbeálja.

8.2 A kísérleti munka rézfólia fúrásával

A réz- és ezüsfólia kísérletekhez a korábban ismertetett IPG-gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú szállézeret használtam ld. 7.2 fejezet. A kísérlet célja hasonló az előbbi fejezetben ismertetetthez, csak az anyag más (réz- és ezüsfóliát használtam), vagyis a különböző lézerbeállításhoz tartozó furatátmérő–Z-koordináta függvények elemzése volt a cél. A kísérletekhez az előző fejezetben ismertetett – általam tervezett – fóliarögzítő eszközt használtam fel. A 7.3 fejezetben kifejtettem milyen kihívásokat rejt a nagy reflexió és nagy hővezetési tényező miatt a réz és az ezüst megmunkálása. Most derül majd ki, hogy a rendkívül kicsire fókuszált lézerfoltméret okozta nagy teljesítménysűrűség előnyt jelent-e? Problémát okozhat az is, hogy a visszavert lézersugárzás visszajuthatna a lézerbe, ott károsodást okozva [78]. A kísérletek során a lézerfej függőleges volt, alatta a próbadarabokat a vízszintessel bezárt $8,11^\circ$ -os szögben rögzítettem, így a beesési és visszavert sugárzás $16,22$ fokot zárt be, tehát nem jutott vissza sugárzás a lézerbe. Ezt a fejezetet az [MGY2] [MGY3] publikációim alapján írtam.

A fóliarögzítőbe alátétként betett $17,5$ mm-es mérőhasáb-kombinációhoz a vízszintessel bezárt $8,11^\circ$ -os szög tartozik, mely a korábban ismertetett (32) egyenletből származtatható. Ennél a lézernél nem lehetett azt elérni, mit az Nd:YAG-nál, ahol a lemezen mérhető impulzusok okozta elváltozás távolságát fixen lehetett tartani. A szállézernél állandó volt az impulzusfrekvencia, tehát például a munkadarab mozgató asztal indulásakor kisebb sebességnél közelebb voltak a furatok egymáshoz ld. 31. ábra. Tehát a furatközéppontok egymáshoz képesti z-koordinátáinak számolásához mikroszkóppal meg kellett mérni két furatközéppont közötti változó távolságot, D -t (31. ábra), és ebből kellett Z_2 z-koordináta eltérést számolni szinusz összefüggéssel (29. ábra).



29. ábra
Két furatközéppont közötti Z_2 magasság származtatás

A lézer mozgatórendszerére szerelt készüléket a 30. ábra mutatja. A mozgatórendszer x és y síkban mozgat, a z tengely a lézersugárzás terjedési iránya, mely a mozgatórendszer síkjára merőleges irány, a lézerfej fix helyzetű a rendszerben.

A közös kísérleti beállítások a következők voltak:

– fókuszállás a lézerfejen: $-2,6$ mm, – munkagáz: nitrogén 5 bar nyomáson.

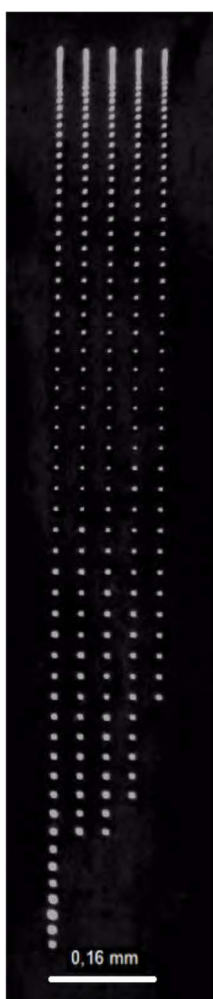


30. ábra
A mérőhasábbal állítható fóliarögzítő a lézerfej alatt

50 mikrométer vastag rézfólia fúrását végeztem különböző energiájú lézerimpulzusokkal. Beállítottam az impulzusidőt állandó értékre, 0,2 ms-ra. Változtattam a teljesítményszintet 60-80% között; ez meghatározta a kijelzett impulzus-átlagteljesítményt. Számítottam az impulzusenergiát, mely az impulzus-átlagteljesítmény és az impulzusidő szorzata. Tehát az összetartozó kísérleti változókat, melyekkel egy furatsor készült, a 18. táblázat mutatja.

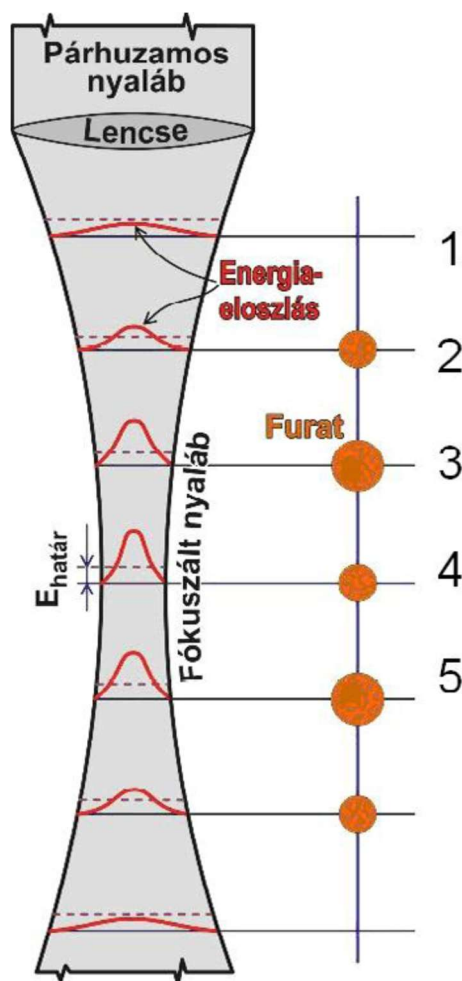
<i>Teljesítményszint (%), kísérleti változó:</i>	60	65	70	75	80
<i>Impulzusfrekvencia Hz, beállított érték:</i>	40	40	40	40	40
<i>Impulzusidő ms, beállított érték:</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Impulzusenergia mJ, számolt érték:</i>	197,8	213,4	229	245	259,2
<i>Impulzus-átlagteljesítmény W, számolt érték:</i>	989	1067	1145	1225	1296
<i>Átlagteljesítmény mW, számolt érték:</i>	7912	8536	9160	9800	10368

18. táblázat
Rézfólia fúrási kísérleténél oszloponként egy furatsorozathoz tartozó adatok



31. ábra

Rézfólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban

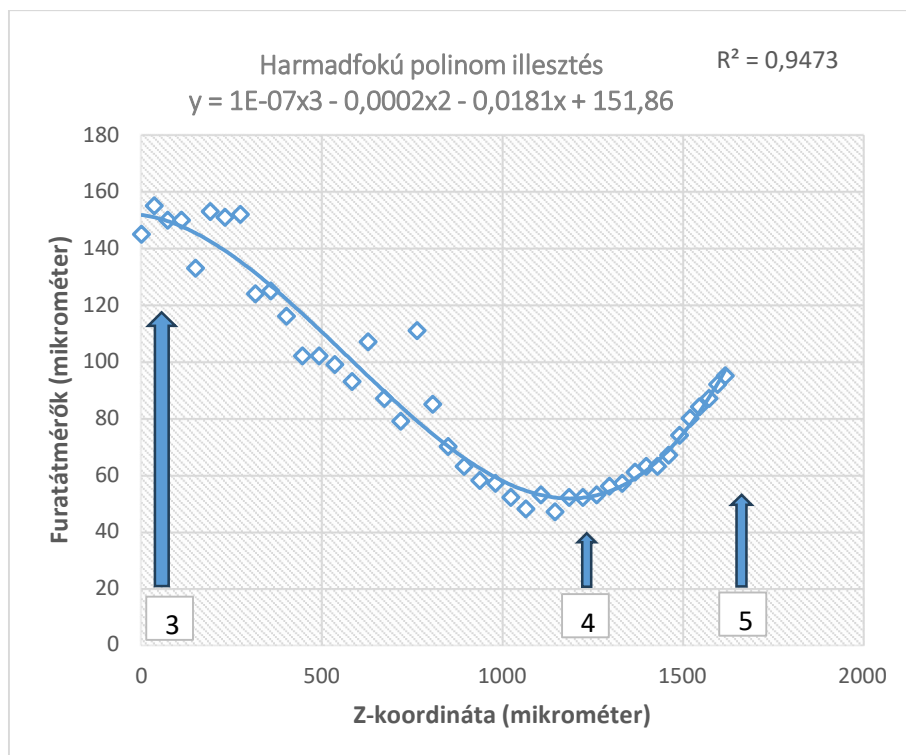


32. ábra

Az olvasztási határenergia és a fókuszált nyaláb kölcsönhatása

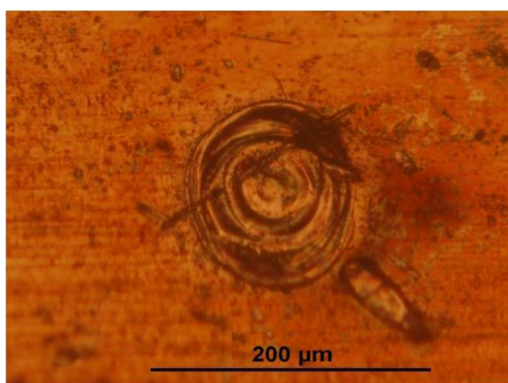
A 31. ábra a rézfólia furatait mutatja mikroszkóp alatt, hátsó megvilágításban a kép alja a lézerfejhez közelebbi régiót ábrázolja. A jobbról balra növekvő impulzus-átlagteljesítmény a fúvókához egyre közelebb lyukaszt. A furatok a kép tetején a kis sebesség és az állandó impulzusfrekvencia miatt egymásba érnek.

A rögzített lézerfejhez képest 10 mm/s^2 mozgató rendszer gyorsulást és 20 mm/s mozgatási sebességet állítottam be. A 32. ábra az olvasztási határenergia, és a fókuszált nyaláb kapcsolatát ábrázolja. A fókuszfolttól távol nagyon szétterül a nyaláb, itt már nem elég a felületegységre jutó energia az anyag átolvasztásához. Ilyen furatkezdeményt mutat a 34. ábra.



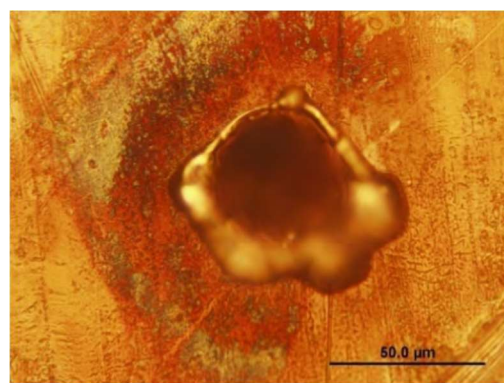
33. ábra

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



34. ábra

A szétterülő nyaláb miatt itt nem jött létre furat



35. ábra

Egy, a fúvókához közeli furat képe

A 32. ábra és a 33. ábra furatátmérőinek Z koordinátától függő régiói összepárosíthatók:

- 2. régió: A maximálisnál kisebb furatok: itt a nyaláb energiaszórása éppen metszi az olvasztási határt, ilyen furatok nincsenek.
- 3. régió: A maximális furatok: itt a nyaláb energiaszórása a legnagyobb átmérőt eredményezve metszi az olvasztási határt.

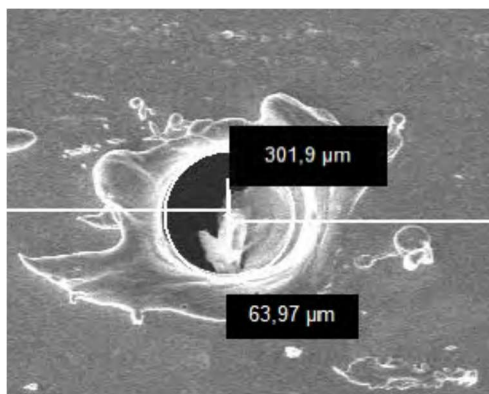
— 4. régió: A minimális furatok: itt a nyaláb energiaeloszlása a legkisebb átmérőt hagyva metszi az olvasztási határt, tehát itt van a nyaláb fókusza.

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

Egy fontos dolgot még tekintetbe kell venni: A Gauss-eloszlás és az $E_{\text{határ}}$ energiasűrűség met-széseként létrejönne az olvasztott furat átmérője, azonban 7.3.2-ban leírtak szerint a hővezetés miatt is megolvad anyag a, így nagyobbak lesznek a furatok annál, mint ami a 32. ábrából kö-vetkezne.

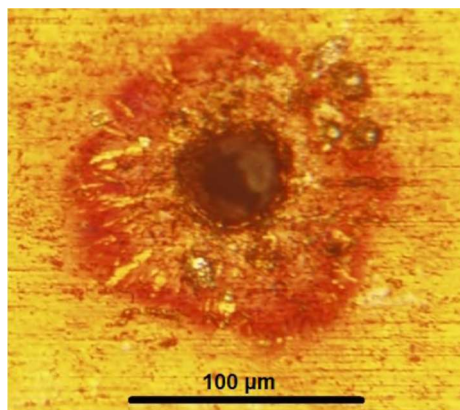
A 35. ábra egy, a fűvókához közel eső furat képét mutatja, ahol a nitrogén gáz szétfröcskölte az olvadt anyagot: itt nehéz átmérőt meghatározni, mert a furatok kráter alakúak és lefelé szűkü-lően kúposok. Ez esetben négy zóna különböztethető meg:

1. A legnagyobb kör a hőhatásövezet.
2. Utána következik a megolvadt anyag átmérője.
3. Ezután a furat átmérője a lézerforrás felőli fólia oldalon: ezeket mértem.
4. A legkisebb kör a lemez alján mérhető átmérő: sajnos ebbe a tapadósalak is beárnyékol (ld. 36. ábra).



36. 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



37. ábra

Egy, a fűvókától távolabbi furat

A fúvókától távolabbi furatoknak (37. ábra) jobbak a kontúrjai és könnyebben mérhetők – bár szabálytalanok, mivel inkább ellipszisre emlékeztetnek. A furatok körül található nagy átmérőjű hőhatásövezet az erősen reflektáló anyag miatt alakult ki: itt nem elég az impulzusenergia az anyag átolvasztásához. A különböző fókuszhelyezettel létrejövő furatok

átmérőjének Z koordinátafüggvénye közel állandó volt, az impulzusadatoktól függetlenül. Ennek oka, hogy az impulzusenergia csak kb. 25%-kal változott, és a furatok átmérőinek szórása nagy volt (ld. 35. ábra magyarázatát).

8.3 A kísérleti munka ezüsthólia fúrásával

150 mikrométer vastag ezüsthólia fúrását végeztük különböző idejű lézerimpulzusokkal. Beállítottuk az impulzusidőt 0,1 és 0,5 ms között. Beállítottuk a teljesítményszintet 100%-ra; ez meghatározta a kijelzett impulzusteljesítményt, mely az első adatsor kivételével 1580 watt körül volt. Az ezüsthólia háromszor olyan vastag volt, mint a réz, ezért kellett nagyobb teljesítmény. Számítottuk az impulzusenergiát, mely az impulzusteljesítmény és az impulzusidő szorzata. Tehát az összetartozó kísérleti adatokat, melyekkel egy furatsor készült a 19. táblázat mutatja. Ezt a fejezetet az [MGY2] [MGY3] publikációim alapján írtam.

<i>Teljesítményszint (%), kísérleti változó:</i>	100	100	100	100	100
<i>Impulzusfrekvencia Hz, beállított érték:</i>	40	40	40	40	40
<i>Impulzusidő ms, beállított érték:</i>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
<i>Impulzusenergia mJ, számolt érték:</i>	148,1	316,6	475,2	635,6	791,5
<i>Impulzus-átlagteljesítmény W, számolt érték:</i>	1481	1583	1584	1589	1583
<i>Átlagteljesítmény mW, számolt érték:</i>	5924	12664	19008	25424	31660

19. táblázat

Ezüsthólia fúrasi kísérleténél oszloponként egy furatsorozathoz tartozó adatok

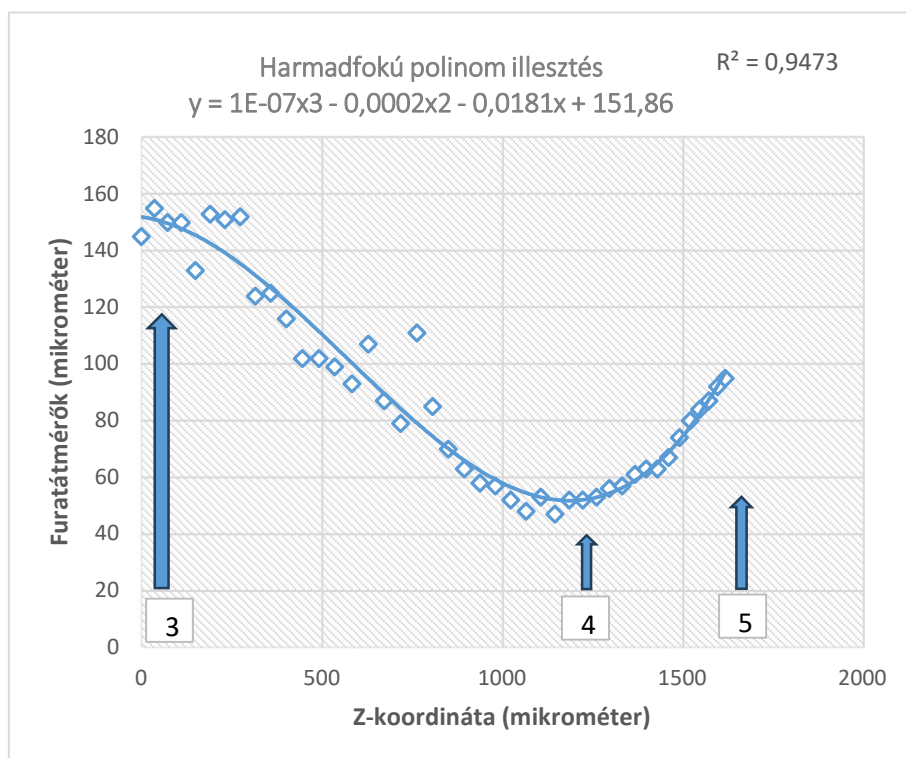


38. ábra

Ezüsthólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban

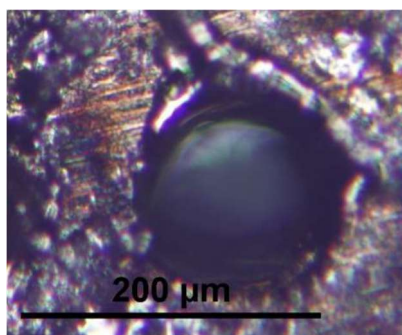
A 38. ábra az ezüsthólia furatait mutatja hátsó megvilágításban a kép bal oldala a lézerfejhez közelebbi régiót ábrázolja. Fenn az első furatsor kezdete hiányzik: itt nincs lyukasztás, mert 7%-kal kisebb az impulzusteljesítmény. A többi furat képe azonos lefutást mutat, mert állandó az impulzusteljesítmény.

A furatok a kép tetején és az alján a kis sebesség és az állandó impulzusfrekvencia miatt egymásba érnek. A munkadarab lézerfejhez képesti gyorsulása és sebessége és a Z-koordináta korrekciója azonos a rézmintánál ismertetettnél. A 32. ábra és a 39. ábra furatainak Z-koordináta függvényének régiói összepárosíthatók: de itt csak a 3. 4. és az 5. régió figyelhető meg a nagyobb impulzusteljesítmény miatt. A 40. ábra egy, a fúvókához közeli furat képén olvadt anyag fröcskölési nyomát mutatja, mely nehezzé teszi a furatátmérő mérést, de nem annyira, mint ami a 35. ábra réz furatánál látszott.



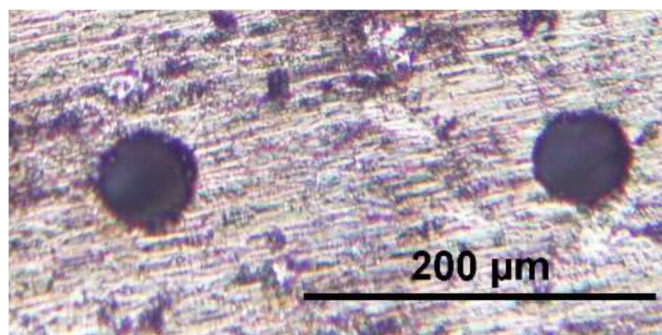
39. ábra

Ezüst minta 636 mJ impulzusenergiával létrehozott furatinak Z koordináta függvénye, és annak régiói; Z=0 a lézerfejhez közelebbi koordináta



40. ábra

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



41. ábra

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

A 41. ábra két, a fúvókától távoli kontrasztos furat képét mutatja, itt a hőhatásövezet kevésbé látszik, mint a réznél. A 39. ábra mutatja a létrejött furatok átmérőinek függését a lézersugár függőleges terjedési irányába eső Z koordinátától. A furatátmérők erős ingadozást mutatnak, mert az összes szilárdtest lézer hátránya, hogy nem adnak egyenletes impulzusokat. Ennek az az oka, hogy nem stacionárius üzemben működnek. Mivel a fókuszált lézernyaláb foltmérete

rendkívül kicsi, így a csóva-jelenség is könnyebben létrejön, ez is okozhat szóródást a furatátmérőkben.

Azonban 39. ábra függvényéhez hasonlóan a többi kísérleti beállításnál a furatátmérők Z koordináta függvénye közel állandó volt, ez azt mutatja, hogy a megmunkálás szempontjából nem csak pusztán az impulzusenergia számít, hanem az is, hogy azt mennyi idő alatt vittük be, tehát az impulzusteljesítmény. Ez pedig a kísérlet során közel állandó volt. A lézersugaras megmunkálás szakirodalma is W/cm^2 felületi teljesítménysűrűség szerint osztályozza a megmunkálásokat. Ennek ellenére levonható az a következtetés, hogy a furatátmérőkre legerősebben a Z koordináta hat. A lézerrel történő mikromegmunkáláskor ez nem zavaró, mivel ott nagyobb frekvenciával kisebb energiájú impulzusokat adnak le, így az impulzusenergia-eltérések átlagolódnak.

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 ezért a furatátmérők z koordináta függvényei erős ingadozást mutatnak, ennek lehetséges okai:

- A lézeres fúrásnál olyan hatások lépnek fel, mint a csóvaképződés 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 egyenletlenségek a munkadarabon (50 mikrométer) a furatátmérők 10%-os változást okozhatják [64].

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

8.4 A fóliafűrés eredményeinek összehasonlítása

Fűrt anyag	Ezüst	Vörösréz	1.4301 Rozsdamentes acél
Vastagsága (mikrométer)	200	50	20
Lézer	IPG-gyártmányú, 150/1500-QCW-AC típusú szállézer		LASAG KLS-246 Nd:YAG lézer
M^2 nyalábminőségi tényező	1,1		5
Kísérleteimnél felhasznált maximális impulzus-átlagteljesítmény (W)	1500	1296	417
Egyimpulzusos fűréssel létrehozott furatátmérő tartomány (mikrométer)	50–150	45–150	50–95
Abszorpció szobahőmérsékleten	3%	4%	31%
Hővezetési tényező ($J/(s \cdot m \cdot K)$)	406	385	50,2
Hőterjedés egydimenziós modell alapján (mikrométer)	369	302	67
N_2 munkagáz nyomása	5 bar	5 bar	5 bar (és 2 bar)

20. táblázat

A fóliafűrés eredményeinek és bemeneti változóinak összehasonlítása

20. táblázat tartalmazza a fóliafűrés eredményeinek és bemeneti változóinak összehasonlítását, amelyről az alábbi következtetések vonhatóak le:

Legvékonyabb a rozsdamentes acél fólia, ennek átfűréséhez kellett a legkisebb impulzusteljesítmény.

Két ellentétes tendencia figyelhető meg az anyagtulajdonságok között, emiatt a létrehozott legkisebb furatátmérők kicsit térnek el:

- Az ezüsthöz képest a rozsdamentes acél abszorpciója szobahőmérsékleten tízszeres, tehát az acélban jobban nyelődik el, azaz jobban hasznosul a lézer hullámhosszán az energia.
- Az ezüst és a réz hővezetési tényezője nyolcszorosa a rozsdamentes acélénak, így több anyag tud megolvadni, és eltávozni az anyagból a hővezetés miatt a rézben és az ezüstben, ez ellensúlyozza az abszorpció hatását. A hőterjedésnél is hasonló tendenciák figyelhetők meg, mint a hővezetési tényező elemzésekor.

A legnagyobb furatátmérők a réznél és az ezüstnél 50%-al több mint az acélé, ez a nagyobb impulzus-átlagteljesítmény hatása. Az acélnál az 5 bar-os nitrogén munkagáz nyomásnál mért furatátmérőket hasonlítom össze a többi anyagnál mértékével. Ugyanakkor a három kísérletben sok eltérés van, ezért nehéz összehasonlítani az eredményeket.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására egy kifejlesztettem és elkészítettem egy kísérleti eszközt. Ez változtatható magasságú mérőhasáb kombináció alátámasztása mellett biztosítja a lézernyaláb hossz tengelyére merőleges síkhoz képest a megmunkált fólia kiszámolható szögben való rögzítését, így egy lépésben rövid idő alatt létrejön egy furatsorozat. Az általam fejlesztett kísérleti eszközzel meg lehet vizsgálni különböző lézerberendezéseken az impulzusos üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését. Ezzel nemcsak egy új eszközt, hanem egy módszert, új eljárást fejlesztettem ki, melyből az egyimpulzusos fúrás furatátmérőjének fókuszpozíció függése vizsgálható. A módszert ausztenites rozsdamentes acél, réz és ezüst anyagokon vizsgáltam, működőképességét igazoltam kísérleti programok végrehajtásával és kiértékelésével. Itt a különböző fókuszpozícióban létrehozott furatok szabályosságának és hibáinak elemzése jön szóba.

Új módszert dolgoztam ki olyan képletek együttes használatára, amelyeket soha nem publikáltak együtt az impulzusos üzemi lézeres vágás terén. Az eredmény a különféle képletekből meglévő számítási algoritmusok egyesítése, teljes paraméterrendszer meghatározása. A tudományos publikációkban hiányos technológiai és optikai adatok meghatározása. Tehát egy hiányos gyártási paraméterhalmaz kiegészítése Ezen adatok alapján az impulzusos üzemi lézeres vágás a kísérleteit meg lehet ismételni, technológiáját meg lehet tervezni, és továbbfejleszteni más lézerrendszereken is.

A fókuszfoltátmérő (d_{f0}) és a Rayleigh-hossz (Z_R) képletébe be kell építeni azt, hogy a Galilei teleszkóppal modellezhető nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot, mert a nyalábtágító előtti d_0 nyalábtátmérő a nyalábtágítónak köszönhetően B_e -szeresére táguul, így a képletek az alábbiak szerint módosulnak:

$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_0 B_e}$$

$$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_0^2 B_e^2}$$

Itt λ a sugárzás hullámhossza, f : a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, M^2 a nyalábminőségi tényező, d_0 a nyalábtágító előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője. Az új képletekből rögtön kiszámolható, hogy a nyalábtágító hogyan változtatja meg a fókuszfoltátmérőt és a Rayleigh-hosszat, aminek technológiai haszna van, például vékony cső,

sztent alapanyag vágásakor tágítva a nyalábot csökken a fókuszfoltátmérő, ezzel csökken a vágási rés, a nagyobb energiakoncentráció miatt gyorsabban lehet vágni. A Rayleigh-hossz is lecsökken, így a szemközti csőfalon jobban szétterül a nyaláb, a szemközti csőfalat kisebb hőkárosodás éri.

Definiáltam egy képletet a munkadarabból eltávolított egységnyi eltávolított térfogatra jutó energia kiszámítására sztentgyártási csövek axiális vágására a vágási rés keresztmetszetének felső szélessége alapján, ez egyben az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia:

$$E_V = \frac{E_i 1000 \mu m}{D_{BT} 1 mm a_v \left(\frac{k_1}{1000} \right)}$$

Itt E_V az egységnyi eltávolított térfogatra jutó energia, más értelmezésben az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia. E_i egy impulzus energiája, D_{BT} két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság az anyagon, a_v az anyagvastagság, k_1 a vágási rés szélessége fent.

Az egységnyi térfogatra jutó energia minimalizálása a cél, úgy, hogy még át lehessen vágni az anyagot. Ennek az ad jelentőséget, hogy ha túl nagy az egységnyi térfogatra jutó energia, akkor a megmunkált cső átellenes oldala hőkárosodást szenved, a hőkárosodás rontja a korrózióállóságot.

Kidolgoztam egy értékelési rendszert a lézeres sztentvágás funkcionális biztonságot érintő 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 funkcionális biztonsági vágásminőség, annál jobban garantálható a sztent biztonsága az emberi szervezetbe való beépítés oldaláról nézve, tehát végső soron a technológia biztonságossá tétele a cél. Itt nem a súlyozási faktorok jelentik a tézist, azok változhatnak a technológia és a megmunkált anyag változásával, hanem maga az értékelési rendszer új. A sztentek lézeres vágása során biztonság-nak tekintem azt, hogy a lézeres vágás ne veszélyeztesse azokat a termékminőség-követelményeket, amelyek a sztent megfelelő működését (mechanikai és bio- / hemokompatibilitási funkció) biztosítják. Ebből az is következik, hátrányok közül azokat, amelyek a befogadó emberi testre kedvezőtlen hatással lehetnek, a funkcionális biztonsági vágásminőség csökkentésével minimalizálni lehet, vagyis a sztent biztonságosságát erősíteni.

Új tudományos eredmények

1. Tézis [MGY1] [MGY2] [MGY3]

A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására egy kifejlesztettem egy eljárást, és elkészítettem az ehhez szükséges kísérleti eszközt. Ezzel az eljárással meg lehet vizsgálni különböző lézerberendezéseken az impulzusos üzemmódban készített furatok átmérőinek fókuszpozíciótól való függését.

2. Tézis [MGY4] [MGY5] [MGY6]

Új számítási módszert dolgoztam ki olyan képletek együttes használatára, amelyeket soha nem publikáltak együtt a lézeres vágás terén. Az eredmény a különféle képletekben meglévő számítási algoritmusok egyesítésével, a megismételhetőséghez szükséges, teljes lézertechnológiai paraméterrendszer meghatározását teszi lehetővé.

3. Tézis [MGY7] [MGY8]

A fókuszfoltátmérő (d_0) és a Rayleigh-hossz (Z_R) képletébe be kell építeni azt, hogy a Galilei-teleszkóppal modellezhető nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot, mert a nyalábtágító előtti d_0 nyalábátmérő a nyalábtágítónak köszönhetően B_e -szeresére tágul, így a képletek az alábbiak szerint módosulnak:

$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_0 B_e}$$

$$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_0^2 B_e^2}$$

Itt λ a sugárzás hullámhossza, f : a fókuszálólencse fókusztávolsága, M^2 a nyalábminőségi tényező, d_0 a nyalábtágító előtti, közel kollimált lézernyaláb átmérője.

4. Tézis [MGY6]

Definiáltam egy képletet a munkadarabból eltávolított, egységnyi eltávolított térfogatra jutó energia kiszámítására sztentgyártási csövek vágásánál a vágási rés keresztmetszetének felső szélessége alapján. Ez egyben az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia; az eredményt J/mm³-ban kapjuk.

$$E_v = \frac{E_i \text{ (mJ)} \cdot 1000 \text{ } \mu\text{m}}{D_{BT}(\mu\text{m}) \cdot 1 \text{ mm} \cdot a_v(\mu\text{m}) \cdot \left(\frac{k_1(\mu\text{m})}{1000}\right)}$$

Itt E_v az egységnyi eltávolított térfogatra jutó energia, más értelmezésben az 1 mm hosszú vágási rés anyagának eltávolításához szükséges energia. E_i egy impulzus energiája, D_{BT} két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság az anyagon, a_v az anyagvastagság, k_1 a vágási rés szélessége fent.

5. Tézis [MGY6]

Kidolgoztam egy átfogó értékelési rendszert a sztentek lézeres vágási hibáinak a sztent funkcionális biztonságára gyakorolt hatásaik erőssége szerint súlyozott értékelésével és rendszerezésével. Az így meghatározott funkcionális biztonsági hatástényezőknek az összegzésével értékelhető és minősíthető a sztentek lézeres vágásának minősége. Így definiáltam a funkcionális biztonsági vágásminőséget, amely a funkcionális biztonsági hatástényezők összege, amelyek mindegyike pedig áll egy darab, technológiai alapú hibaértékszámából és egy darab, funkcióbiztonsági alapú súlyszámból. Az általam alkalmazott súlyozási faktorok változtathatók a technológiai feltételek és a megmunkált anyag sajátosságai alapján.

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 Angliában megjelent PhD értekezés [46],[79].

A koszorúér tágító sztentekre vonatkozó kutatásaimnak fontos szempontja a folyamat beágyazás: a lézerrel kivágott, elektropolírozással / maratással lekerekített, oxidrétegtől megszabadított sztentet, mint eszközt hogyan használják? Először az érbe bevezetett ballonkatéterre zsugorítják, hogy kis méret miatt könnyebben lehessen bevezetni, ezt hívják krimpelésnek. Majd az elzáródott koszorúérbe vezetve a ballont élettani sóoldattal feltágítva a sztent maradékalakváltozással kitágul. A ballonkatétert leeresztve, kihúzva az érrendszerből eredeti átmérő közelében megmarad a sztent által feltágított érszakasz, így az eredetileg elzáródott ér újra szabad lesz, és az általa ellátott szív rész nem hal el. Ebbe a folyamatba beágyazva vizsgálható a sztent gyártásának és a szervezetbe ültetés biztonságának összefüggésrendszere. Orvosszakmai oldalról az a követelmény a sztenttel kapcsolatban, hogy a beépítés és az ér beépítést követő kitámasztása során jól ellássa funkcióját.

Az általam definiált egységnyi térfogatra jutó energia minimalizálásával el lehet érni, a megmunkált cső átellenes oldala ne szenvedje hőkárosodást. A hőkárosodás rontja a korrózióállóságot. Itt tekintetbe kell venni, hogy a vér nem Ph-semleges, hanem enyhén lúgos, 0,4 % NaCl-t tartalmaz, korrózió esetén a sztent jobban irritálja az eret a beépítés helyén, és gyengébb is lesz.

A lézeres sztentvágás funkcionális biztonságot érintő hibáinak számszerűsítésére kidolgoztam a funkcionális biztonsági vágásminőséget eredményező rangsorolási rendszert. Minél kisebb a funkcionális biztonsági vágásminőség, annál jobban garantálható a sztent biztonsága az emberi szervezetbe való beépítés oldaláról nézve, tehát végső soron a technológia biztonságossá tétele a cél. Ez a sztent mechanikai megfelelősége és bio- / hemokompatibilitási funkció betöltése. Az a lényege a funkcionális biztonságnak, 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. Úgy kell meghatározni a sztent bordaméretét, hogy az utómegmunkálás után adódjon ki a funkció biztonságos ellátásához megfelelő méret, ne alakuljon ki sztent bordatörés.

Ha más anyagból vágják a fémből készült sztentet, vagy változnak a lézeres vágás technológiai jellemzői (pl. ultrarövid impulzus használatánál nincs hőhatásövezet, a vágott csőbe vezetett

víz [72] által kevesebb a salak és a cső lézeres nyalábbelépéssel szemközti oldalán nincs hőkárosodás) akkor a súlyfaktorok és a szempontrendszer továbbfejleszthető adaptálható az új anyaghoz és technológiához.

A lézernyaláb hossz tengelye mentén a különböző fókuszpozícióban létrehozható furatok szabályozott előállítására általam kifejlesztett egy kísérleti eszközzel egy lépésben létre lehet hozni egy furatsorozatot. Ezzel az egyimpulzusos fúrás furatátmérőjének fókuszpozíció függése vizsgálható. A módszer más anyagokra is alkalmazható, én rozsdamentes acél, réz és ezüsthóliára alkalmaztam.

Új módszert dolgoztam ki olyan képletek együttes használatára, amelyeket soha nem publikáltak együtt. Az eredmény a különféle képletekből meglévő számítási algoritmusok egyesítése, teljes paraméterrendszer meghatározása. a tudományos publikációkban hiányos technológiai és nyalábjellemző adatok meghatározása impulzusos üzemű lézeres vágás esetén. Tehát egy hiányos gyártási paraméterhalmaz kiegészítése Ezt a módszert tovább lehet fejleszteni más lézerek rendszerek és más lézeres technológiák felé.

A fókuszfoltátmérő (d_{f0}) és a Rayleigh-hossz (Z_R) képletébe beépítettem azt, hogy a Galilei teleszkóppal modellezhető nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalábot, mert a nyalábtágító előtti d_0 nyalábátmérő a nyalábtágítónak köszönhetően B_e -szeresére tágul, így a képletek az általam ajánlottak szerint módosulnak. Az új képletekből rögtön kiszámolható, hogy a nyalábtágító hogyan változtatja meg a fókuszfoltátmérőt és a Rayleigh-hosszat, aminek technológiai haszná van, például vékony cső, sztent alapanyag vágásakor tágítva a nyalábot csökken a fókuszfoltátmérő, ezzel csökken a vágási rés, a nagyobb energiakoncentráció miatt gyorsabban lehet vágni. A Rayleigh-hossz is lecsökken, így a szemközti csőfalon jobban szétterül a nyaláb, a szemközti csőfalat kisebb hőkárosodás éri.

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

[MGY1] Meszlényi G, Bitay E. Az egyimpulzusos lézersugaras fúrás folyamatának elemzése. Országos Magyar Bányászati És Kohászati Egyesület Lapja 2018; 2018/5-6:pp 40-44

[MGY2] Meszlényi G, Bitay E. A fókuszhelyzet szerepe erősen reflektáló anyag egyimpulzusos, lézersugaras fúrásakor. Acta Materialia Transylvanica Magyar Kiadás 2019;2: pp 61–68. <https://doi.org/10.33923/amt-2019-01-10>.

[MGY3] Meszlényi G, Bitay E. The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials. Acta Materialia Transylvanica 2019;2: pp 61–68. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-10>.

[MGY4] 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: pp 72–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.33924/amt-2022-02-05>.

[MGY5] Meszlényi G, Bitay E. Szállézők sugármenetének elemzése a nyalábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig. Acta Materialia Transylvanica Magyar Kiadás 2022;5: pp 72–77. <https://doi.org/10.33923/amt-2022-02-05>.

[MGY6] Meszlényi G, Bitay E. Influence of Laser Cutting on the Functional Safety of Metallic Vascular Stents. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 2025;online first: pp. 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3311/PPme.40060>.

[MGY7] Meszlényi G, Bitay E. A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál. Acta Materialia Transylvanica 2019;2: pp 115–120. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-02-09>

[MGY8] 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>

EGYÉB, A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [MGY9] 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.
- [MGY10] Meszlényi G, Bitay E. Impulzus üzemű lézersugaras mikromegmunkálás és biztonságtechnikája. In: Molnár, György; Wühl T, editor. KVK PhD Workshop Minikonferencia, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar; 2023, p. 11.
- [MGY11] Bitay E, Puskás Z, Kulin T, Meszlényi G. Bioanyagok lézersugaras vágási technológiája. 27. Hegesztési Konferencia, Budapest: 2014, pp. 405–414.
- [MGY12] 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, pp. 209–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.659.209>
- [MGY13] Meszlényi G, Izápy V. Science in practice 2008. In: Galić R, editor. Optimization Method of Laser Cutting Parameters for High Precision Stainless Steel Tubes, Osiek, Croatia: Faculty of Electrical Engineering J.J. Strossmayer Univ. of Osijek; 2008, pp. 95–97.
- [MGY14] Meszlényi G, Nagy P, Bella S, Dobranszky J. Laser beam cutting and welding of coronary stents. BID-ISIM WELDING AND MATERIAL TESTING 14, Temesvár, Románia: 2008, pp. 17–11.
- [MGY15] Meszlényi G, Dobránszky J, Dévényi L. LASER CUTTING OF STAINLESS STEEL THIN SHEETS WITH PULSED Nd:YAG LASER. Gépészet, Budapest, Magyarország: 2008, pp. 1–6.
- [MGY16] Meszlényi G, Dobránszky J, Puskás Z. Laser cutting of high precision tubes. Materials Science Forum 2008; 589: pp 209–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.589.427>.

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
expozióra vonatkozó minimális egészségi és biztonsági követelményekről Hatályos:
2023. 01. 01 2010.
- [3] Laser stencil https://www.pcbgogo.com/knowledge-center/Laser_Stencil.html
(letöltve 2025. augusztus 27.).
- [4] Laser resistor trimming system
<https://laserod.com/capabilities/laser-resistor-trimming/>
(letöltve 2025. augusztus 27.).
- [5] F. Ready. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Laser Institute of America;
2001. ISBN 0-912035-15-3 pp. 96-512
- [6] Stournaras A, Salonitis K, Chrysosolouris G. Optical emissions for monitoring of the
percussion laser drilling process. International Journal of Advanced Manufacturing
Technology 2010;46: pp. 589–603. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2111-y>.
- [7] Buza G. Lézersugaras technológiák II. Edutus Főiskola; 2012., p. 78.
- [8] Micro-hole-drilling <https://www.potomac-laser.com/services/micro-hole-drilling/>
(letöltve 2025. augusztus 27.).
- [9] Buza G. Lézersugaras technológiák I. Edutus; 2012., pp. 3-65.
- [10] 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_lazerfny_fbb_jellemzi.html](http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lézerek_az_orvostudományban/31_a_lazerfny_fbb_jellemzi.html) (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [11] MSZ EN ISO 11553-1:2020/A11:2021 Gépek biztonsága. Lézeres megmunkálógépek.
1. rész: Lézerbiztonsági követelmények :pp.1-8.
- [12] MSZ EN 60825-4:2006/A2:2011 Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírásai. 4. rész:
Lézervédelmek
- [13] IEC TR 60825-14: 2004. Lézergyártmányok sugárbiztonsági előírása. 14. rész:
Felhasználói útmutató
- [14] MSZ EN ISO 11252:2013 Lézerek és lézerberendezések. Lézerkészülékek.
A dokumentáció minimumkövetelményei

- [15] MSZ EN 12254:2010 Lézermunkahelyek védőernyői. Biztonsági követelmények és vizsgálat
- [16] MSZ EN ISO 19818-1:2021 Szem- és arcvédelem. Lézersugárzás elleni védelem. 1. rész: Követelmények és vizsgálati módszerek : pp. 9–11.
- [17] MSZ EN 207:2017 Személyi szemvédő eszközök. Szűrők és szemvédők lézersugárzás ellen
- [18] MSZ EN 208:2010 Személyi szemvédő eszközök. Szemvédők lézerek és lézerrendszerek beállítási munkáihoz (lézerbeállítási szemvédők)
- [19] MSZ EN 61508-1:2010 Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága. 1. rész: Általános követelmények
- [20] MSZ EN IEC 62061:2021 Gépek biztonsága. A biztonsággal összefüggő vezérlőrendszerek működési biztonsága
- [21] MSZ EN ISO 13849-1:2016 Gépek biztonsága. Vezérlőrendszerek biztonsággal összefüggő részei. 1. rész: A tervezés általános alapelvei
- [22] MSZ ISO 31000:2018 Kockázatmenedzsment. Irányelvek
- [23] MSZ EN ISO 12100:2011 Gépek biztonsága. A kialakítás általános elvei. Kockázatfelmérés és kockázatsökkentés
- [24] (89/391/EGK) a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítását ösztönző intézkedések bevezetéséről
- [25] 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
- [26] Nem kötelező érvényű útmutató a 2006/25/EK irányelv végrehajtása során alkalmazható legjobb gyakorlatokhoz (Mesterséges optikai sugárzás)
- [27] 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

- [28] 23/2024. (XII. 16.) EM rendelet a munkára való alkalmassági vizsgálat kötelező elrendeléséről
- [29] 4/2009. (III. 17.) EüM rendelet az orvostechnikai eszközökről
- [30] 22/2012. (IX. 14.) EMMI rendelet az egészségügyi felsőfokú szakirányú szakképesítés megszerzéséről
- [31] 156/2017. (VI. 16.) Korm. rendelet a haditechnikai tevékenység engedélyezésének és a vállalkozások tanúsításának részletes szabályairól
- [32] MSZ EN ISO 11145:2019 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések. Szakszótár és jelképek
- [33] 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 Con-cept, Elsevier B.V. 2014, pp. 681–688.
<https://doi.org/doi:10.1016/j.phpro.2014.08.161>.
- [34] 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, pp. 901–908. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>.
- [35] Thombansen U, Hermanns T, Stoyanov 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, pp. 98–102.
- [36] Hashemi S, Sabouri S, Khorsandi A. In situ measurement of laser beam quality. Applied Physics B (2017) 123:233 2017: pp. 233–234.
<https://doi.org/10.1007/s00340-017-6811-y>.
- [37] 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, pp. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.019>.

- [38] 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: pp. 1–10. <https://doi.org/10.2351/1.5065757>.
- [39] 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: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.06.001>.
- [40] Kaplan AF. Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting. Shaker Verlag Aachen; 2002. pp.10-18.
- [41] Paprikás B, Szabó S, Kocsisné Baán M, Tolvaj B, Bencs B. Lézeres mérési- és megmunkálási eljárások a gépészetben. Nemzeti Tankönyvkiadó 2009. pp. 10-18.
- [42] Harp W, Paleocrassas A, Tu J. A Practical method for determining the beam profile near the focal spot. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2008;37:1113–1119. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>. pp. 1113-1119.
- [43] Paschotta R. Rayleigh Length https://www.rp-photonics.com/rayleigh_length.html. (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [44] Gaussian-Beam-Optics.pdf <https://experimentationlab.berkeley.edu/sites/default/files/MOT/Gaussian-Beam-Optics.pdf>. (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [45] 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
- [46] 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. pp. 1-186.
- [47] Technical Guide: Laser Optics - Formulary <https://www.silloptics.de/en/service/sill-technical-guide/laser-optics/formelsammlung> (letöltve 2025. augusztus 27.)

- [48] Marco Mendes. Fiber laser micromachining in high-volume manufacturing. Industrial Laser Solutions 2015; <https://www.laserfocusworld.com/home/contact/14282507/marco-mendes> (letöltve 2025. augusztus 27.)
- [49] Momma, C. Knop, U, Nolte, S.: Laser Cutting of Slotted Tube Coronary Stents – State-of-the-Art and Future Developments, pp. 39-44. Progress in Biomedical Research 1999. <https://www.msbt.nat.fau.de/PBMR/documents/199904010039.pdf> (letöltve 2025. augusztus 27.)
- [50] Chen CS, Lin SY, Chou NK, Chen YS, Ma SF. Optimization of laser processing in the fabrication of stents. Materials Transactions 2012;53: pp. 2023–227. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012188>.
- [51] 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>. pp. 1-11.
- [52] 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: pp. 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.11.020>.
- [53] Guerra AJ, Ciurana J. Minimum Quantity Lubrication in Fibre Laser Processing for Permanent Stents Manufacturing. Procedia Manufacturing 2019;41:pp. 492–499. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.036>.
- [54] 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: pp. 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.021>.
- [55] Chen K, Yao YL. Process optimisation in pulsed laser micromachining with applications in medical device manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2000;16: pp. 243–249. <https://doi.org/10.1007/s001700050152>.
- [56] Gökhan Demir A, Previtali B. Comparative study of CW, nanosecond- and femtosecond-pulsed laser microcutting of AZ31 magnesium alloy stents. Biointerphases 2014;9: pp. 1–10. <https://doi.org/10.1116/1.4866589>.

- [57] Dobránszky J. Anyagismereti és technológiaismereti alapok. Budapest: DyTh Bt.; 2023. pp. 125-245.
- [58] Major L. Endoluminális tágítóbetét enlarging facing for blood-vessels. Hungarian Patent, P9602099, 1996.,
- [59] László Major. Medstent: Tágítható érfaltámasztó gyűrű expandible stent. Hungarian Patent, P9900429, 1996.
- [60] Process parameter influences on the laser drilling process <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-influence-do-process-parameters-have-on-the-laser-drilling-process>. (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [61] ISO/TR 25901-5 Welding and allied processes – Vocabulary – Part 5: Laser welding. 2024.
- [62] Yilbas B.S. Parametric study to improve laser hole drilling process. Journal of Materials Processing Technology 1997;70:264–73.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00076-9). (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [63] Naeem M. Laser Solutions Short Courses Short Course # 2 What Laser Drilling Can Do for Your Business. ICALEO 28th International Congress on application of lasers & electro-optics, Orlando, Florida, USA: 2009, p. 1–27.
- [64] 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, pp. 403–406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.157>.
- [65] Duley W. Laser welding, 1. edition. Wiley-Interscience; 1998. ISBN 0-471-24679-4 P.69.
- [66] Periodic table <https://ptable.com/?lang=hu#Tulajdonságok>. (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [67] Thermal properties of matter <https://ncert.nic.in/textbook/pdf/keph203.pdf>. (letöltve 2025. augusztus 27.).
- [68] MSZ EN ISO 25539-1:2017 Szív- és érrendszeri implantátumok. Endovaszkuláris eszközök. 1. rész: Endovaszkuláris protézisek
- [69] MSZ EN ISO 7198:2017 Szív- és érrendszeri implantátumok és extrakorporális ü rendszerek. Érprotézisek. Cső alakú érgraftok és érrendszeri foltanyagok (ISO 7198:2016)

- [70] Kathuria YP. Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy. Journal of Materials Processing Technology 2005;170: pp. 545–550.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.041>.
- [71] Nagy P, Dobránszky J. Laser cutting of small diameter nitinol tube. Materials Science Forum, vol. 729, Trans Tech Publications Ltd; 2013, pp. 460–463.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.460>.
- [72] 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: pp. 2261–2267.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.015>.
- [73] Chen CS, Lin SY, Chou NK. Optimization technology and developing of vascular stents. Applied Mechanics and Materials, 2013, pp. 390–397.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.390>.
- [74] Puskás Z, Antalfi, Dobránszky. Lézeres mikromegmunkálás. In: EMT, editor. OGÉT 2009 Országos Gépész találkozó, Gyergyszentmiklós, Románia: 2009, p. 335–339.
- [75] Halmai A. Finommechanikai szerkezetek. Edutus Főiskola; 2012. p. 131.
- [76] Low D. Characteristics of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling. Journal of Materials Processing Technology, 118 2001: pp.179–186.
- [77] MSZ EN ISO 17658:2015 Hegesztés. Lángvágott, lézersugárral vágott, és plazmával vágott felületek eltérései. Terminológia
- [78] Naeem M. Laser Processing of Reflective Materials. Laser Technik Journal 2013;10: pp. 18–20. <https://doi.org/10.1002/latj.201390001>.
- [79] Kleine K. Micromachining with single mode fibre laser for medical device production. The University of Liverpool, 2009. <https://livrepository.liverpool.ac.uk/1295/>

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Jelölés	Megnevezés	A nagy pontosságú megmunkálás szakirodalmában használatos mértékegység
α	A vágási rés keresztmetszetének félszöge	fok
a_v	Anyagvastagság	μm , mm
B_e	A nyalábtágító hányszorosára tágítja a nyalá-	
BPP	Nyalábparaméter-szorzat	mm·mrad
d_0	A nyalábtágító előtti nyalábtátmérő	mm
d_b	A fókuszálólencse előtti közel párhuzamos nyaláb átmérője, ha nincs nyalábtágító	mm
D_{BT}	Két szomszédos impulzusnyom középpontja közötti távolság az anyagon	μm
d_{f0}	Fókuszfoltátmérő	μm
d_{fc}	A nyalábvezető optikai szál magátmérője	μm
E_i	Impulzusenergia	mJ
E_v	Egységnyi térfogatra jutó energia a vágási rés szélesség alapján	J/mm ³
f	A fókuszálólencse fókusz távolsága	mm
f_{coll}	A kollimátorlencse fókusz távolsága	mm
f_i	Impulzusfrekvencia	Hz
h_t	A Tapadósalak magassága	μm
K	K nyalábterjedési tényező	
k_1	Vágási rés szélesség felül	μm
k_2	Vágási rés szélesség alul	μm
l_m	A mikrorepedések hosszúsága	μm
λ	Lézer hullámhossz	nm vagy μm
M^2	Nyalábterjedési tényező M^2	
P_{av}	Lézer átlagteljesítmény	W
P_i	Impulzus-átlagteljesítmény	W
PO	Vágási foltátfedés	%
r_{f0}	Fókuszfoltsugár	μm
R_{max}	A felületi érdesség maximuma	μm
s	A munkadarab elmozdulása a lézerhez képest az impulzusidő alatt	μm
Θ_σ, Θ	A fókuszált nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge	milliradián
s_h	A hőhatás szélessége a cső nyalábbelépéssel szemközi, belső oldalán	μm
s_m	A megömlött réteg vastagsága	μm
s_o	Az oxidréteg vastagsága	μm
s_s	A hőhatásövezet szélessége	μm

21. táblázat

Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései α -tól s -ig

Jelölés	Megnevezés	A nagy pontosságú megmunkálás szakirodalmában használatos mértékegység
t_i	Impulzusidő	ms
v	Vágási sebesség	mm/s
z	A nyalábterjedés irányába mutató koordináta	mm
z_0	A fókuszszík z-koordinátája	mm
Z_R	Rayleig-hossz	μm

22. táblázat

Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései t-től z-ig

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat A sztentgyártásra használt szállézerekben előállított lézernyalábok jellemzői	24
2. táblázat A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai.....	26
3. táblázat A sztentvágó és az általános mikromegmunkáló lézerek adatainak összehasonlítása.....	27
4. táblázat A két lézer paramétereinek összehasonlítása.....	42
5. táblázat Anyagok Abszorpció (A) és Reflexió (R%) adatai a lézer hullámhosszához közeli 1064 nanométeres hullámhosszon és szobahőmérsékleten.....	43
6. táblázat A felhasznált anyagok periódusos rendszerbeli és termodinamikai tulajdonságai	44
7. táblázat Termális diffúzitási adatok, és behatolási mélység	45
8. táblázat Ezüsfólia összetétele	45
9. táblázat Nd:YAG lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel vannak szedve	49
10. táblázat Szállézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel vannak szedve	50
11. táblázat A sztentgyártásra használt ultrarövid impulzus idejű lézernyalábok jellemzői...	53
12. táblázat Ultrarövid impulzus idejű lézeres sztentgyártás kiszámolt hiányzó adatai dőlt és vastag karakterrel szedve	54
13. táblázat A saját vágási sebességet variáló kísérlet, az újonnan kiszámolt adatok dőlt és vastag karakterrel vannak szedve	55
14. táblázat Sztent vágási hibák értékelési rendszere.....	60
15. táblázat Példa a vágási minőség értékelésére, Corina lézerrendszerrel, oxigén munkagázzal vágott 1.4306 rozsdamentes acél cső vágása, a falvastagság 120 mikrométer volt	62

16. táblázat Ausztenites acélfólia fúrási kísérleténél soronként egy furatsorozathoz tartozó impulzusadatok.....	63
17. táblázat A munkagáz nyomásának és az impulzusenergiának hatása a furatátmérők szélsőértékeire	71
18. táblázat Rézfólia fúrási kísérleténél oszloponként egy furatsorozathoz tartozó adatok.....	73
19. táblázat Ezüsfólia fúrási kísérleténél oszloponként egy furatsorozathoz tartozó adatok..	78
20. táblázat A fóliafúrások eredményeinek és bemeneti változóinak összehasonlítása.....	81
21. táblázat Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései α -tól s-ig.....	97
22. táblázat Az értekezésben használt fontosabb mennyiségek jelei és megnevezései t-től z-ig	988
23. táblázat Az értekezésben használt magyar szakkifejezések és angol megfelelőik.....	105

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése [40]	20
2. ábra A fókuszált lézernyaláb jellemzői	23
3. ábra A fókuszált nyaláb hosszmetseti vázlata cső vágásakor.....	24
4. ábra A fókuszoltátfedés szemléltetése	30
5. ábra Fókuszoltátfedés szemléltetése	31
6. ábra Sztentes értágítás [57]	34
7. ábra Koszorúér tágító sztent (Minvasive Kft. Budapest, Magyarország)	35
8. ábra Különböző anyagok abszorpciója Nd:YAG és CO ₂ lézer hullámhosszán [9]	36
9. ábra [62] A lézerrel fúrt furat részletei. A-kiöblösödés, B-megömlött anyag, C-kimeneti kúp, D-felső felületi anyaglerakódás, α -bemeneti kúp, Θ -kúpszög, MD-átlagos furatátmérő. 38	
10. ábra A Corina vágórendszer	40
11. ábra A szállézer helyszíni bemérésén felvett négyszögimpulzus.....	42
12. 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.	56
13. 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.....	56
14. ábra A vágási rés keresztmetszete 1,200 mm átmérőjű, 0,120 mm falvastagságú, 1.4306 anyagú rozsdamentes acél cső vágásakor.....	58
15. ábra Tapadósalak a cső belső falán D = 1,200 mm, v = 0,120 mm, anyag: 1.4306 acél. A vágást a Corina sztentvágásra használt lézerberendezéssel végeztem	58
16. ábra Sztentek lézeres vágási paramétereinek összefüggései	59
17. ábra Termikus elszíneződés (hőkárosodás) csőnek a lézeres vágás nyalábbelépési helyével átellenes oldalának külső falán, 1 – Erős hőkárosodás, 2 – Gyenge hőkárosodás, 3 – Másik vágási vonalak,	61
18. ábra Szinuszméchanizmus [75]	64
19. ábra A fóliarögzítő szerkezet modellje.....	64
20. ábra A fóliarögzítő szerkezet a lézerfej alá, a munkadarab-mozgatórendszerre szerelve..	64
21. ábra Két furatközéppont közötti Z ₁ magasság származtatása	66
22. ábra A fókuszált lézernyaláb különböző vízszintes síkjaiban különböző méretű furatok jönnek létre.....	67
23. ábra A második kísérletsorozatban, 2 bar nyomású N ₂ munkagázzal készített furatsorozatok.....	67

24. ábra 30 mJ impulzusenergiával készített furatsor közepe: nagy hőhatásövezet a furatok körül	68
25. ábra 30 mJ impulzusenergiával készített furatsor vége: szabálytalan felső kontúrú furatok	68
26. ábra 5 bar nyomású nitrogén gázzal, 30 mJ energiával készített furatok felső lemezsíkon mért átmérője a Z koordináta függvényében.....	69
27. ábra 2 bar nyomású N_2 gázzal, 30 mJ impulzusenergiával készített furatok felső lemezsíkon mért átmérője a Z koordináta függvényében.....	70
28. ábra A 30 mJ és a 10 mJ impulzusenergiával készített furatsor eleje	71
29. ábra Két furatközéppont közötti Z_2 magasság származtatás	72
30. ábra A mérőhasábbal állítható fóliarögzítő a lézerfej alatt	73
31. ábra Rézfólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban.....	74
32. ábra Az olvasztási határenergia és a fókuszált nyaláb kölcsönhatása	74
33. ábra Rézminta 213 mJ impulzusenergiával létrehozott furatainak Z koordinátafüggvénye és annak régiói; $Z = 0$ a lézerfejhez közelebbi koordináta	75
34. ábra A szétterülő nyaláb miatt itt nem jött létre furat	75
35. ábra Egy, a fűvókához közeli furat képe	75
36. 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	76
37. ábra Egy, a fűvókától távolabbi furat	76
38. ábra Ezüsfólia furatairól készített mikroszkópi kép hátsó megvilágításban	78
39. ábra Ezüst minta 636 mJ impulzusenergiával létrehozott furatának Z koordináta függvénye, és annak régiói; $Z=0$ a lézerfejhez közelebbi koordináta	79
40. ábra Egy, a fűvókához közeli furat képe, olvadt anyag fröcskölési nyoma látszik.....	79
41. ábra Két, a fűvókától távoli furat képe, itt a hőhatásövezet kevésbé látszik, mint a réznél	79

FÜGGELÉK

Lézersugaras Fúrási adatlap YLR-150/1500 QCV szállézerhez **Réz minta**

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

Helyszín: Pulzor Művek, Rétság, Pusztaszántói út 10.

Cél: Furatsorozat-fókuszpozíció kísérlet

Teljesítményszint % (kísérleti változó)	60	65	70	75	80	b
Impulzus frekvencia Hz:	40	40	40	40	40	b
Impulzusidő ms.:	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	b
Impulzusenergia mJ=W*ms (számított):	198	213	229	245	259	sz
Impulzus teljesítmény W:	989	1067	1145	1225	1296	k
Lézer átlagteljesítm mW=mJ*Hz (számított)	989	1067	1145	1225	1296	sz
Fúrás sikeres (I/N)?	I	I	I	I	I	
Fókuszállás a fejen mm:	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	b
Kísérleti eszköz mérőhasáb magasság mm:	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	b
Azonos beállítással készült furatok sorszáma:	1	2	3	4	5	

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

Mozgatórendszer sebessége: 20 mm/s

Mozgatórendszer gyorsulása: 10 mm/s²

Munkagáz: N₂ nyomás: 5 bar

Nyalábtágító állás: 1

Fúvóka távolsága az anyagtól: változó

A fólia szöge 17,50 mm mérőhasáb alátámasztásánál: 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 mikrométer

A fenti érték 40 Hz frekvenciánál és 17,50 mm mérőhasáb alátámasztásánál érvényes, állandó munkadarab mozgó sebességnél.

Az anyag: **vörösréz fólia**

Vastagsága: 50 mikrométer

Egy beállítással készült furatközéppontokat összekötő alakzat: 16 mm egyenes

Azonosító jelzései: 2-es számú fólia; + Z irányt a lézerfej felé bekarcolt nyíl jelez

Környezeti hőmérséklet: 24,6 Celsius lézer kijelzőjén

Páratartalom: 24,6 % RH

Lézersugaras Fúrási adatlap YLR-150/1500 QCV szállézerhez **Ezüst minta**

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

Helyszín: Pulzor Művek, Rétság, Pusztaszántói út 10.

Cél: Furatsorozat-fókuszpozíció kísérlet

Teljesítményszint % (kísérleti változó):

Impulzus frekvencia Hz:

Impulzusidő ms (kísérleti változó):

Impulzusenergia $mJ=W*ms$ (számított):

Impulzus átlagteljesítmény W:

Lézer átlagteljesítm $mW=mJ*Hz$ (számított)

Fúrás sikeres (I/N)?

Fókuszállás a fejen mm:

Kísérleti eszköz mérőhasáb magasság mm:

Azonos beállítással készült furatok sorszáma:

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

100	100	100	100	100	b
40	40	40	40	40	b
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	b
148	317	475	636	792	sz
1481	1583	1584	1589	1583	k
5924	1266	1900	2542	3166	sz
I	I	I	I	I	I
-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	b
17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	b
3	4	5	6	7	

Mozgatórendszer sebessége: 20 mm/s

Mozgatórendszer gyorsulása: 10 mm/s²

Munkagáz: 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 mikrométer

A fenti érték 40 Hz frekvenciánál és 17,50 mm mérőhasáb alátámasztásnál érvényes, állandó munkadarab mozgó sebességnél.

Az anyag: **ezüst fólia**

Vastagsága: 200 mikrométer

Egy beállítással készült furatközéppontokat összekötő alakzat: 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

A SZAKIRODALOMBAN HASZNÁLT ANGOL SZAKKIFEJEZÉSEK MAGYAR MEGFELELŐI

Az alábbi szakkifejezéseket az MSZ EN ISO 11145:2019 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések szabványból vettem ; a szabvány 2008. évi kiadása magyar nyelven is elérhető [32]

Magyar	Angol
átlagteljesítmény	average power
felületegységre jutó impulzusenergia	pulse energy per unit surface area
fókuszálhatóság	focus ability
fókuszálólencse	focusing lens
fókuszált nyaláb	focused laser beam
fókuszáltnyaláb-keresztmetszet	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
késél szkennelő	knife edge scanning
kollimált	collimated
kristályrúd	crystal rod
lézeres megmunkálás	laser processing
lézeres vágás	laser cut
M ² tényező	M ² factor
mátrixérzékelős detektor	matrix sensor
megmunkáló lézer	machining laser
mikromegmunkálás	micromachining
módus szerkezet	modus structure
nagy érzékenység	high sensibility
nem folyamatos lézerműködés	non-continuous laser operation
nyaláb átmérő	beam diameter
nyaláb deréksugár	beam waist radius
nyalábgyengítés	beam attenuation
nyalábminőség-romlás	degradation of beam quality
nyalábminőséget kifejező változók	beam quality numbers
nyalábminőségi tényező, M ²	beam propagation ratio, M ²

Magyar	Angol
nyalábparaméter-szorzat	beam parameter product
nyalábtágítási tényező	beam expander factor
nyalábterjedés irányába mutató z-koordináta	z-coordinate towards the beam spreading direction
nyalábterjedési tényező, K	beam propagation factor, K
Rayleigh-hossz	Rayleigh length
résszkennelő	slit scanning
rezonátor	resonator
salak	dross
nyalábtengely	beam axis
tágítatlan	unexpanded
táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge	angle of the asymptote cone covering the expanding beam
távolimező-divergenciaszög	far field divergence angle
termikus lencsézés	thermal lensing
torzít	distort
utómegmunkálás	post processing
vágási minőség, vágásminőség	cut quality
vágási rés	kerf
változó görbület	changing curvature
zoomos, 8-fokozatú nyalábtágító	zoom 8-step beam expander

23. táblázat

Az értekezésben használt magyar szakkifejezések és angol megfelelőik

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 Dobránszky 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 készüléskészítésben.

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

Köszönöm Nagy Lajos kollégámnak a szinuszmechanizmus 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 háttérrel.

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