



Neumann János Egyetem
GAMF Műszaki és Informatikai Kar
Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

**Femtosekundumos lézersugár által indukált
periodikus felületi struktúra kialakítása alumínium
felületén**

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Szerző:

Bereczki Alexandra

2. Évfolyamos gépészmérnök hallgató

Témavezető:

Dr. Berczeli Miklós, adjunktus

Könyves Zsolt, tanszéki mérnök

Kecskemét

2022

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALOMKUTATÁS.....	4
2.1. ALUMÍNIUM LEMEZEK JELLEMZŐI	4
2.2. ALUMÍNIUM FELÜLETKEZELÉSI MÓDJAI LÉZERSUGÁRRAL	5
2.2.1. Lézersugaras mikromegmunkálás és jellemzői [4].....	6
2.2.2. A lézernyaláb paraméterei [4,5].....	7
2.2.3. Lézersugár- anyag kölcsönhatás [5]	8
2.2.4. A lézersugár és anyag kölcsönhatása a rövid impulzuslézerek esetén	9
2.2.5. Hideg megmunkálás lézerekkel [5]	10
2.2.6. Elektronsokszorozó- hatás [5].....	13
2.2.7. Multifoton-anyag kölcsönhatás [5]	13
2.3. ALUMÍNIUM FELÜLETÉN A LIPSS KÉPZŐDÉSE [5].....	14
2.4. A LÉZER INDUKÁLT PERIODIKUS FELÜLETI STRUKTÚRA ALKALMAZÁSI TERÜLETEI	18
3. CÉLKITŰZÉS	21
4. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK.....	22
4.1. ALUMÍNIUMLEMEZ BEMUTATÁSA	22
4.2. ALKALMAZOTT RENDSZEREK ÉS MÉRÉSI ESZKÖZÖK	25
4.2.1. Spektrométer.....	25
4.2.2. Femtoszekundumos lézerrendszer	26
4.2.3. Fénymikroszkóp.....	27
5. KUTATÁSI EREDMÉNYEK	28
5.1. PONTSZERŰ FELÜLETKEZELÉSI KÍSÉRLETEK.....	28
5.2. 10 MHz-ES FREKVENCIÁVAL KÉSZÍTETT HATÁSFOLTOK VIZSGÁLATA.....	33
6. EREDMÉNYEIM ÖSSZEHASONLÍTÁSA NEMZETKÖZI FOLYÓIRATOK EREDMÉNYEIVEL	52
7. ÖSSZEFOGLALÁS	53
8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	54
9. IRODALOMJEGYZÉK	55

1. BEVEZETÉS

Dolgozatom alapját a napjainkban egyre nagyobb jelentőséggel bíró lézersugaras felületmegmunkálások adták.

Jelen dolgozatban a Lézersugár által létrehozott periodikus felületi struktúrák (Laser Induced Periodic Surface Structure, a továbbiakban LIPSS) képződését ismertetem a nemzetközi szakirodalmak összefoglalása alapján, majd a gyakorlatban is vizsgáltam a felület létrehozásának lehetőségeit az alumínium felületén. A szakirodalmak ugyan több elméletet tekintenek a LIPSS alapjául, azonban ezek egyike sem egységesen elfogadott a kutatók között.

Az irodalmak áttekintése közben azt találtam, hogy a LIPSS vizsgálata inkább acélokon vagy műanyagokon történt mintsem alumínium felületeken. Emiatt én a továbbiakban az alumínium felületének sikeres módosítása érdekében végzek kutatási folyamatot. A különböző felületeken a LIPSS megjelenése kötéstechológiai szempontból érdekes. Többek közt a ragasztás technológiában bír nagy jelentőséggel, mivel a struktúra megjelenése a nedvesítési hatásokat kedvezően befolyásolja. A felület ilyen jellegű megmunkálásával a ragasztás minősége és a kötés erőssége is javítható.

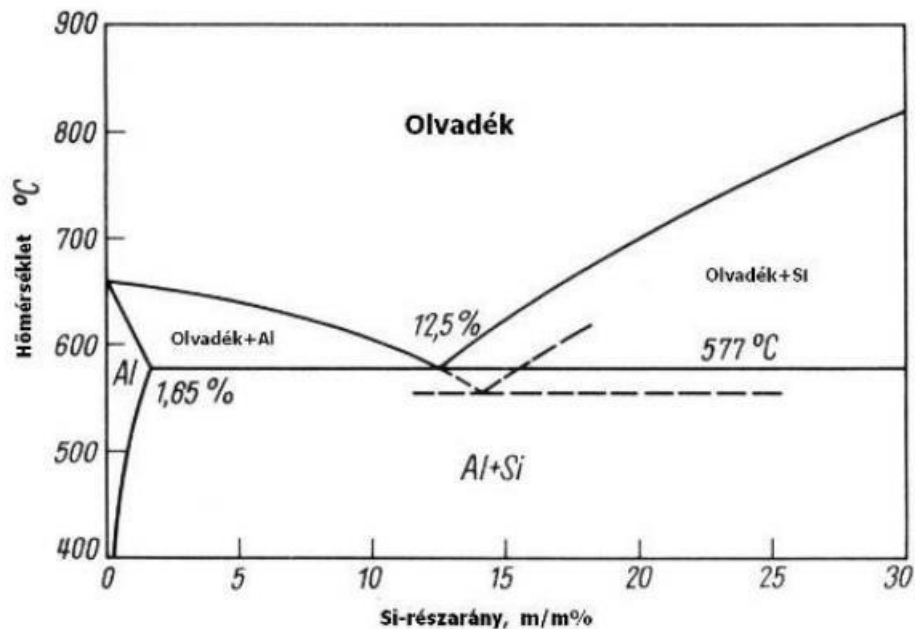
Azért is bír nagy jelentőséggel a dolgozatom, mivel ezen anyagra nagyon kevés tudományos cikket találtam. Amit találtam az ígéretes új perspektívát ad a kutatás folytatására. Ezáltal a jelenlegi eredményeimet többféleképpen is lehet folytatni, ezzel a különböző hatások LIPSS képződésre gyakorolt hatásának vizsgálata a továbbiakban is ígéretes kutatási terület lesz a nanotechnológia világában.

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. Alumínium lemezek jellemzői

Az alumíniumot a könnyűfémek közé soroljuk, mivel a sűrűsége kevesebb, mint $4,5 \text{ kg/dm}^3$. Olvadáspontja alacsony (660°C), rácsszerkezete: lapközepes köbös. A tiszta alumínium minimum 99% alumíniumot tartalmaz, a fennmaradó 1%-ban pedig egyébötvöző és szennyező anyagokat. Felhasználása igen széleskörű, a villamosipartól a gyógyszergyártásig bármely iparágban megtalálható alapanyagként. Az alumíniumot többnyire nem tiszta formában, hanem ötvözetként alkalmazzák.

A szilíciummal való ötvözés fázisdiagramja az 1. ábrán látható.



1. ábra: Alumínium fázisdiagram [1]

Attól függően, hogy milyen mértékben tartalmaz a tiszta fémötvöző anyagokat különböző tulajdonságai alakulnak ki, így változatos felhasználása lehetséges Pl.: vassal ötvözve a mélyhúzóhatóság javul.

Mangánnal ötvözve hidegalakítással (hidegalakító eljárások) a szilárdság növelhető és hegesztésre alkalmas lesz az anyag, ez a tulajdonság fontos az építőiparban és a járműiparban egyaránt. Magnéziummal ötvözve légköri korrózióálló és hegeszthető, a korrózióállóság fontos az építőiparban. Magnéziummal és szilíciummal egyidejűleg ötvözve már nemesíthető ötvözetet kapunk, hegeszthetők és légköri korrózióállóak és az elektromos vezetőképességük is jó.

Rézzelel ötvözve nagyszilárdságú és nemesíthető ötvözetet kapunk, ami a jármű-, gép-és repülőiparban használható, illetve a teherbíró szerkezetek alapanyaga is. Cinkkel ötvözve nagy szakítószilárdság ($R_a=500-700$ MPa) érhető el ugyanakkor feszültségi korrózióra és ridegtörésre hajlamos ötvözetet kapunk. Ez szintén a teherbíró szerkezeteknél, jármű- és építőiparban fontos alkalmazása az alumíniumnak. A magnéziummal ötvözött öntészeti alumínium kiválóan alkalmas felületkezelésre, ami jelen dolgozat esetében fontos szempont [2].

2.2. Alumínium felületkezelési módjai lézersugárral

Az alumíniumok és más fémek későbbi alkalmazásánál kardinális szerepe van a felületi tulajdonságoknak. Akár festeni, bevonatolni, ragasztani, forrasztani szeretnénk az alapanyagot fontos figyelembe venni a felületi jellemzők közül az alapanyag felületitapadását. Szeretnénk jobb tapadású felületet kialakítani egy technológia során, hogy az azt követő adhéziós eljárás jobb minőségű legyen, nagyobb szilárdság alakuljon ki az alumínium felülete és a rávitt másik anyag között. Ennek az adhézióknak a növelésért lehetőség van különböző felületkezelések, felületaktiválások végrehajtására. Ezek a felületkezelések többnyire a felületi nedvesítést, a határfelületi energiáját változtatják meg az anyagnak. Azonban, hogy ezt a nedvesítést javítsunk precíz és jól szabályozott, megértett technológiai lépésre van szükség. Dolgozatom emiatt, továbbiakban egy új és innovatív módját keresem az alumínium felületkezelésének.

Manapság az ipar szinte minden területén előfordul a lézeres anyagmegmunkálás. Ehhez számos típusú lézer áll rendelkezésre, különböző tulajdonságokkal pl.: hullámhossz, energiasűrűség stb., ezek alapján kiválaszthatjuk a célnak leginkább megfelelő lézert.

Az ipari alkalmazásban először a nanoszekundumos lézerek terjedtek el, majd az utóbbi években ezeket a femtoszekundumos lézerek váltották le. Ennek a cserének számos oka volt a megmunkált felület szempontjából. Lézereket használunk a gravírozáshoz, forrasztáshoz és hegesztéshez is, ebből is látható milyen sokoldalúan felhasználható eszköze van szó.

A nanoszekundumos lézerek energiája jóval kisebb, mint a femtoszekundumos társaié, emellett a megmunkált felület "durvább", mivel az anyagot kilöki a munkadarabból. Ezzel szemben a nanoszekundumos lézerek esetében a megmunkálás sokkal finomabb, egyenletesebb, mivel ez esetben az eltávolítani kívánt anyagot a lézernyaláb a felületből elpárologtatja, így a nyaláb helyén egy kis felületi érdességgel rendelkező mélyedés marad hátra.

A nagy energiájú lézernyaláb többszörös fázisátalakulást okozhat a szubsztrátumban (pl.: párolgás, leválás, olvadás és megszilárdulás), valamint szilárdtest-állapotú fázisátalakulásokat, amelyek az olvadt anyag gyors lehűlési sebessége miatt következnek be [4].

2.2.1. Lézersugaras mikromegmunkálás és jellemzői [4]

Lézerek alkalmazásával elkerülhető a megmunkálás során a teljes munkadarab felmelegedése, csak lokálisan és különböző mértékben hevül fel a munkadarab.

Ezt természetesen az anyag hővezetési együtthatója és a lézernyaláb energiasűrűsége együttesen befolyásolja. Azonban kijelenthető, hogy a lézerrel megmunkált darabok méret pontossága messze felülmúlja a hagyományos mechanikai megmunkálásokat, a darab nem szenved, vagy csak minimális nem kívánt alakváltozást szenved.

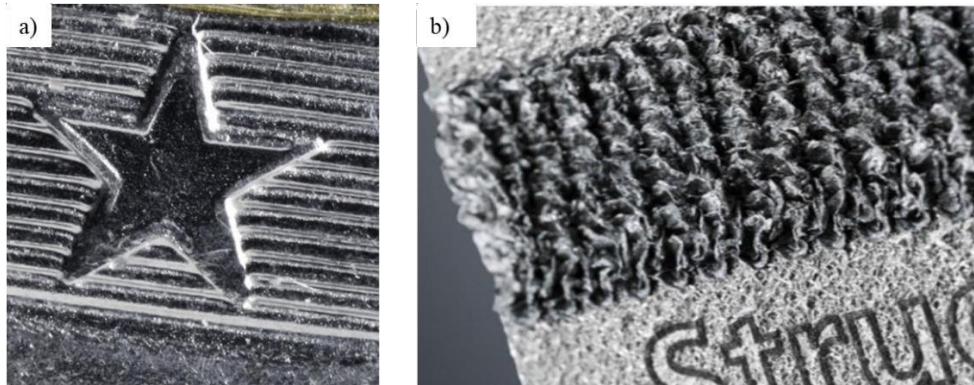
A lézerek a termikus energia révén képesek az anyag kötéseit felbontani. Ezáltal a kötések újra rendeződhetnek és más struktúrát képezhetnek az anyag visszahűlése után. A megmunkálás mechanizmusa az alábbi folyamat szerint játszódik le: a bevitt energia a munkatérfogatot olvadékká alakíthatja, a megmunkálás során olvadék állapotba jutott anyagot vágás esetén nagynyomású segédgáz sugárral gyorsítják fel és távolítják el az átalakított anyagot a felületről ill. a megmunkálási zónából, míg gravírozás és felületi megmunkálás esetén elgőzölögtetik az anyagot a megmunkálandó területről. A technológia alkalmazására példát a 2. ábrán láthatunk. A folyamatot az anyag minősége, a felület állapota, az anyag hővezetési képessége és az abszorpció képessége befolyásolja.

A megmunkálás a munkadarab alapjellemeit akarjuk megtartani és a felületi jellemzőit igény szerint módosítani. Így a lézer paramétereit a megmunkáláshoz érdemes úgy beállítani, hogy lehetőleg csak a javítandó tulajdonságot változtassa meg a megmunkálás, a többi tulajdonság változatlan maradjon vagy minimális szerkezeti változást okozzon azokban a nyaláb. A kívánt megmunkálás elérését az anyag is befolyásolja, így a felület előkészítésének kell az első vagy ha úgy tetszik a 0. lépésnek lennie.

Mivel ha a felület szennyeződést tartalmaz vagy nagyon olajos az nagyban rontja a megmunkálást, mivel a nyalábot nem tudjuk megfelelően a felületre fókuszálni, defókuszált nyalábot kapunk, ezzel a nyaláb hatásai nem a megfelelő mértékben hasznosulnak.

Fontos megjegyezni, hogy vannak olyan lézerek melyek folytonos üzemben, míg mások impulzus üzemben működnek. Ez azért fontos, mivel ezen jellemző határozza meg a lézerek energiáját. Az impulzus üzemi lézerek energiája nagyobb, ezt az energiát nagyon kis

időegység a másodperc tört része alatt képesek leadni, nanoszekundumos lézereknél 10^{-9} s, femtoszekundumosnál 10^{-15} s.



2. ábra: Néhány szemléltetés a mikromegmunkálásra [16]

2.2.2. A lézernyaláb paramétereit [4,5]

A lézerek teljesítménysűrűsége alatt azt az energia mennyiséget értjük, amelyet 1 cm^2 felületre képesek 1 s alatt kibocsátani, mértékegysége: W/cm^2 .

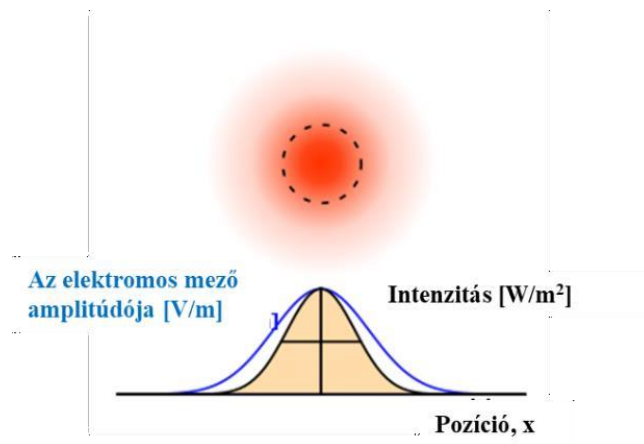
A nyaláb átmérő, a nyaláb divergenciája, hullámhossza, frekvenciája, és az átlagos teljesítmény mind fontos paraméter a megmunkálás során, egyéb fontos paraméter lesz a későbbiekben a nyaláb pásztázó sebessége, a nyaláb időbeli és térbeli stabilitása, fókuszálhatósága.

Ideális esetben a nyaláb Gauss- nyaláb (TEM_{00}), azonban a valóságban a legjobb lézerek is csak megközelítik, mivel a lencsék hibáját nem lehet teljes mértékben megszüntetni. A nyaláb intenzitás eloszlását a 3. ábrán láthatjuk.

A másik fontos adat a Rayleigh- távolság, ez az a távolság, ahol a sugárderék keresztmetszete a kétszeresére növekszik (a sugárderék átmérője $\sqrt{2}$ -szeresére nő). A nyaláb átmérőjét egy kellően távoli pontban vizsgálva megállapítható, hogy a nyaláb átmérője a távolsággal lineárisan változik.

Gyakorlati alkalmazásban ezt divergenciaként ismerjük, ami a nyaláb széttartását jelenti. A divergencia és a sugárderék átmérője adja a sugárparaméter szorzatot, jele: BPP. Ezen adatokból adódik egy további paraméter: M^2 , amennyiben az értéke 1, akkor a nyaláb ideálisnak tekinthető, ha 1-nél nagyobb, akkor nem ideális nyalábról beszélünk.

Ezen paraméterek azért fontosak, minősíteni tudjuk, hogy tudjuk a rendelkezésre álló lézerrendszert, és hogy az milyen nyalábot formál. Minél jobban megközelíti az elméleti értékeket, annál homogénabb a folyamat, ezáltal pontosabb megmunkálás tervezhető.



3. ábra: Lézerfókusz intenzitás eloszlása [2]

Látható milyen sok paraméter befolyásolja a megmunkálás sikerességét.

A továbbiakban a megmunkálás során lejátszódó lézer- anyag kölcsönhatást mutatom be kvantum szinten.

2.2.3. Lézersugár- anyag kölcsönhatás [5]

Mint ismeretes a lézersugár fotonokból áll, ezek minden anyaggal kölcsönhatásbalépnek különböző módon: az anyagban abszorbeálódnak, az anyag felületén reflektálódnak, vagy az anyagon áthaladnak.

Az anyagtól és a fotonok sebességétől függ, hogy melyik mechanizmus következik be.

Egy biztos, a különböző mértékben gerjesztett elektronok vagy molekulák, attól függően milyen lézer típussal dolgozunk az energiájukat a kölcsönhatás pillanatában átadják az anyag elektronjainak, atomjainak, molekuláinak.

A fotonok kb. 20 nm megtétele után teljesen elnyelődnek az anyagban, ezért, ha nagyobb mélységben szeretnénk az anyagot megmunkálni azt nagyobb energia bevitelével érhetjük el. Egyéb esetben, ha kicsi a bevitt energia csak felületi változás jön létre. Ha a sugárzás energiája elég nagy, akkor a felületen gőz képződik, majd egy csatorna alakul ki.

A lézer- anyag kölcsönhatást rengeteg tényező befolyásolja, így fókusz paramétereiktől, az energiasűrűségtől és a kölcsönhatás idejétől függően létrejövő kölcsönhatások típusai:

hevítés

olvasztás

párologtatás,

magas energiasűrűség esetén plazmaképződés jön létre.

2.2.4. A lézersugár és anyag kölcsönhatása a rövid impulzuslézerek esetén

Az ipari alkalmazásban egyre jobban elterjednek az ultrarövid impulzus idejű lézerek, ezért ezen terület fejlesztése és az újabb technológiák ipari alkalmazása az utóbbi években fókuszba került. A femtoszekundumos lézerek különböző hullámhosszon működnek, a teljes spektrumot lefedve az infravöröstől az ultraibolyáig.

Ultrarövid impulzusú lézerek esetén nemlineáris jelenségek játszódnak le, szemben a folytonos üzemű lézerekkel. Ilyenkor az impulzus időtartama néhányszor 10^{-12} - 10^{-15} s. Ennyi idő alatt képes leadni az energiát az anyagnak, továbbá az impulzus rövideje miatt igen nagy elektromos és mágneses térerősség keletkezik, ez az oka a nemlineáris jelenségeknek. Emiatt ezt folyamatot a szakirodalomban hideg megmunkálásként is megtalálhatjuk. Az elnevezés oka, hogy a kölcsönhatás igen rövid ideig tart, ezért nem alakul ki az anyagban jelentős hőérintett zóna. Egy másik fontos folyamat a femtoszekundumos lézerek alkalmazásakor fellépő nemlineáris abszorpció, a multifoton abszorpció.

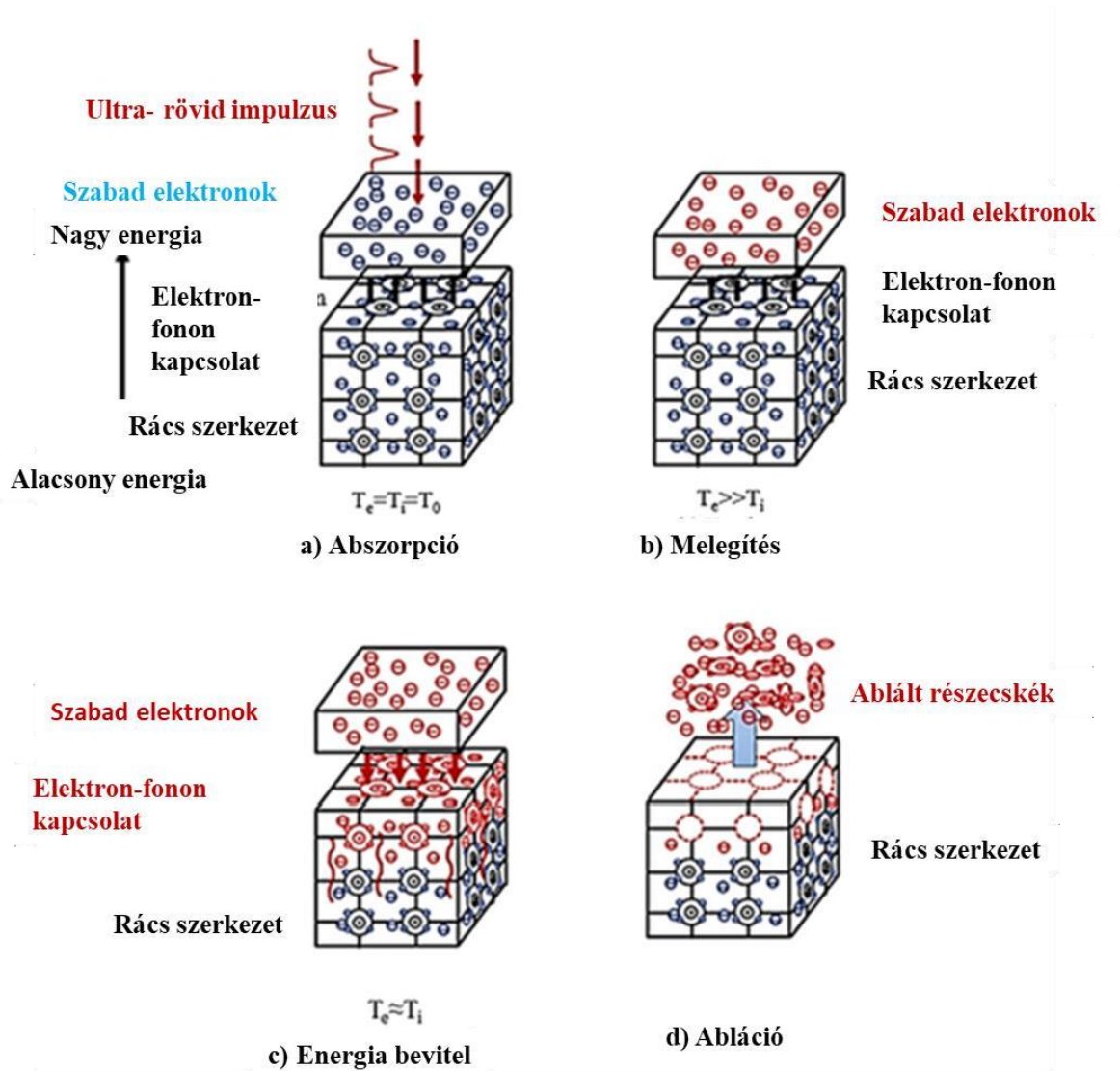
A jelenség lehetővé teszi, hogy optikai szempontból átlátszó anyagokat is megmunkálhatunk.

A valóságban azonban a lézernyaláb az anyagban abszorbeálódik, reflektálódik a felületen vagy keresztülhalad az anyagon, közben az ütközések következtében a fotonok átadják az energiájukat, így gyengítve jut ki az anyagból.

Ezt egy szilárdtest lézer példáján keresztül mutatom be:

A szilárdtest lézerek az infravörös tartományban sugároznak, így az szabad szemmel nem láthatjuk, ám a sugár áthalad olyan tárgyakon amelyeken a szemünk is átlát. Az infravörös és ultraibolya hullámhosszakon működő lézerekkel való munka közben kötelező a védőszemüvegek viselése, melyek a szemünkre káros hullámhosszú fényt kiszűrik így védve látásunkat.

A femtoszekundumos lézerek aktív közege többnyire valamilyen szilárdtest, mivel ezek tulajdonságai adottak ahhoz, hogy ultrarövid impulzusokat tudjunk előállítani.



4. ábra: A lézeres anyagmegmunkálás folyamata [6]

2.2.5. Hideg megmunkálás lézerekkel [5]

Ahogy egyre jobban elterjedt a lézeres megmunkálás, úgy kezdték el alkalmazni először a nano (10^{-9} s)-, pikoszekundumos (10^{-12} s), később pedig a femtoszekundumos (10^{-15} s) lézereket. Ehhez a fejlődéshez hozzájárult az is, hogy a lézeres felületmegmunkálás pontossága egyre fontosabbá vált.

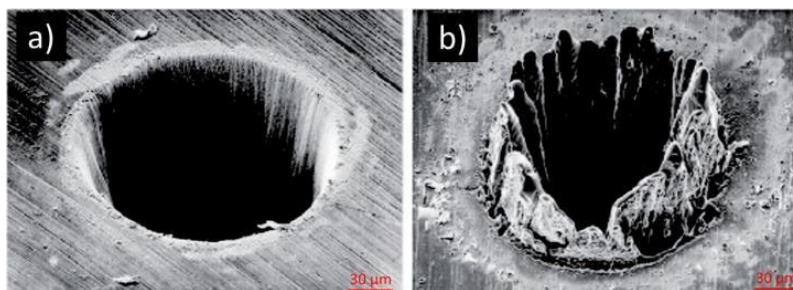
A nanoszekundumos lézerekkel nem érhető el olyan pontosság és felületminőség, mint a femtoszekundumos lézerek esetében. Ezért egyre elterjedtebbé vált a femtoszekundumos lézerek alkalmazása. A femtoszekundumos lézerek alkalmazása azért előnyös, mert igen rövid az impulzushosszuk, ezáltal a sugárnyaláb magas intenzitása és igen nagy teljesítménysűrűségek érhetők el. A felületmegmunkálásra azért előnyös ez a fajta lézer, mivel a munkadarab megmunkálásakor a felesleges anyagot elpárologtatja.

A nanoszekundumos lézereknél az impulzushossz nagyságrendekkel nagyobb (5-6 nagyságrend), mint a femtoszekundumosnál. Ezek a lézerek impulzus üzeműek, ami a megmunkálás szempontjából előnyösebb, mint a folyamatos üzemű. A folyamatos üzemű lézereknél a munkadarab felülete megolvad, míg impulzusüzemben ez nem következik be.

Femtoszekundumos tartományban a lézernek nagy a térbeli felbontása, emellett minimális hőkárosodás és hőhatási övezet keletkezik a nyaláb helyén és annak közelében. Ezáltal az anyag szerkezete minimális változást szenved, az anyag belsejében nem jönnek létre torzulások, repedések, így a későbbi megmunkálásra, pl.: forgácsolásra is alkalmasak a femtoszekundumos lézerek által felületkezelt darabok. A lézer által megmunkált furatok felületi érdességének értéke igen kicsi ($R_a < 2 \mu\text{m}$). Ugyanez a furat egy nanoszekundumos lézerrel már jóval meghaladja a $2 \mu\text{m}$ -es felületi érdességet, továbbá az anyagot kirobbantja a felületből, így az ablációval kiszabadult anyag a darab felszínén marad vagy folyadékban megmunkálva a folyadékba kerül.

A femtoszekundumos lézerek általi felületmegmunkálás során a fő hatás, amely a többivel szemben domináns a fényhullámok diffrakciója. Míg a nanoszekundumos tartományban az anyagban károsodások jöhetnek létre, repedések lökéshullámok, addig a femtoszekundumos tartományban ilyen jellegű folyamatok nem jönnek létre. Nincs hőhatás övezet, vagy csak nagyon minimális, ellenben a lézernyaláb behatolási helyén plazmaképződés jön létre, ami tisztább és pontosabb megmunkálást tesz lehetővé.

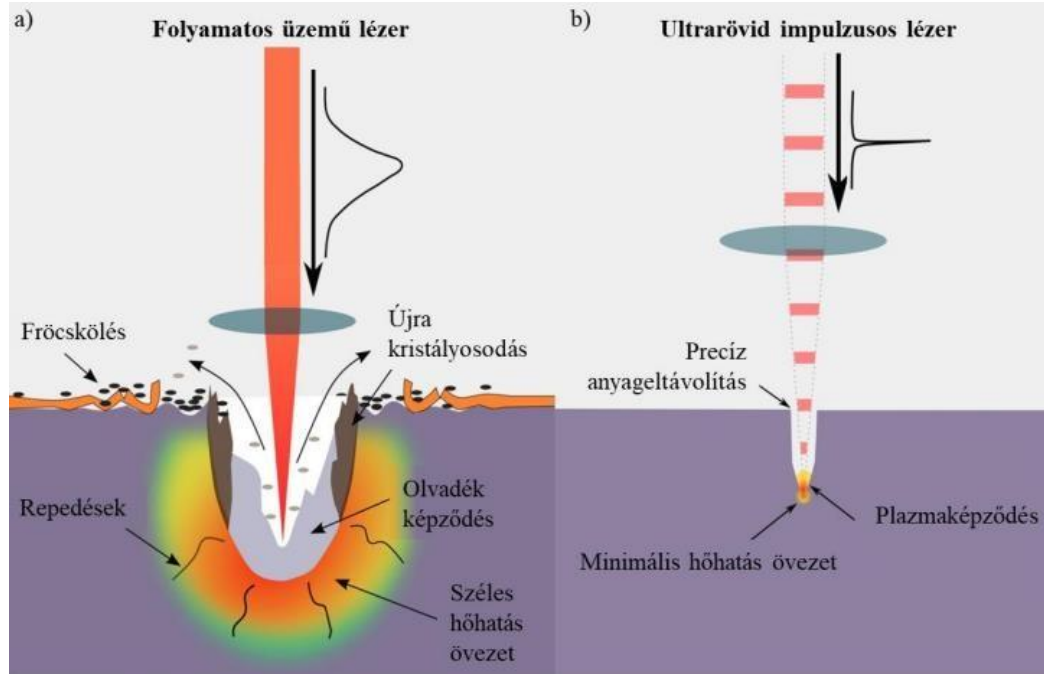
Mindez teljesen ellentétes a nanoszekundumos lézerek folyamataival. Itt a megmunkálás kevésbé pontos és a felületi érdesség is jelentős. Kiterjedt a hőhatási övezet jellemzi a megmunkálás helyét, a megolvasztott zónából az abláció során kiszabaduló részecskék szerkezete a hő hatására megváltozhat, az anyag belső szerkezete átalakulhat kötések felszakadásával és újra rendeződésével. A fent írtak és az ábra alapján már látjuk is a különbséget a lézeres megmunkálást illetően.



5. ábra: Pásztázó elektronmikroszkópi felvétel egy (a) nagyon rövid impulzus idejű lézerrel való megmunkálásról és (b) egy hosszabb impulzus idejű berendezéssel készült megmunkálásról [5]

Ultrarövid impulzus esetén láthatjuk, hogy a hőhatási övezet csekély a hosszabb impulzushoz képest. Ahogyan az az 5. ábrán is látható. Ennek oka a gyors energia bevitel. Az anyagban a nyaláb energiája termikus rezgésre kényszeríti az elektronokat, azoknak időre van szükségük, hogy újra termikus egyensúlyba (alapállapotba) kerüljenek, ez néhány 100 fs vagy mindössze néhány ps időtartam, tehát ez egy igen gyors folyamat. Ugyanakkor az elektronok ezt az energiát tovább adják a fonon alrendszernek, ehhez is időre, kb. 1-100 ps-nyi időtartamra van szükség. Ezt a többlet energiát a fononok a rácspont körüli mozgás amplitúdójával tárolják. Azonban ez az idő függ az elektron- fonon kötési erőttől is. Amennyiben az elektronok nem tudják leadni az energiájukat a kristályrácsnak, akkor az anyag hőmérséklete nem növekszik meg. Ezt a folyamatot mutatja be 4. ábra.

Következésképp az ultrarövid impulzusú lézerek az energiát az elektronoknak adják át, azokat hozzák rezgésbe, az elektronok mozgása miatt egy igen forró elektronfelhő jön létre. Az elektronfelhő hőmérséklete meghaladja a kristályrác hőmérsékletét, így különböző hőmérséklet jön létre az anyagok elektron rendszer és fonon rendszer között. Mérnöki szempontból ez azt jelenti, hogy az ultrarövid impulzusú lézerek (ps, fs) alkalmasabbak a mikrostruktúrák létrehozására, mint a nanoszekundumos lézerek, mivel a besugárzott energiának csak kis része fordítódik az anyag melegítésére.



6. ábra: A nanoszekundumos (a) és a femtoszekundumos (b) lézeres ablációs folyamatok összehasonlítása [8]

A 6. ábra alapján is jól látható, hogy az eltérő nagyságrendű hullámhosszakon működő lézerek hatásmechanizmusa teljesen más.

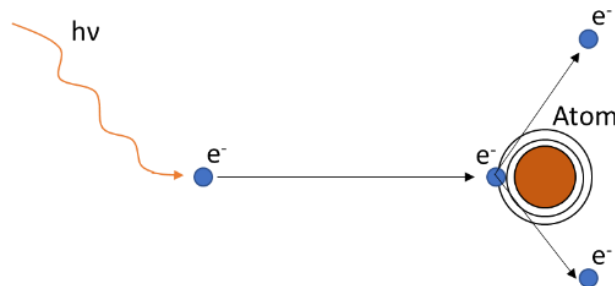
2.2.6. *Elektronsokszorozó- hatás [5]*

A nyaláb és az anyag kölcsönhatása fotonok és elektronok közt jön létre közeli IR tartományban.

A nyaláb fotonjai az elektronokkal való ütközés során a többlet energiát az elektronoknak adják le, ezzel az elektron egy gerjesztett (magasabb) energiaszintre kerül. Ha az atommag körül keringő kötött elektronok energiaszintjét megnöveljük kiszakadnak a kötésből, így szabadelektronokká válnak. Minden anyagnak vannak szabadelektronjai, ezek azok az elemi részecskék amelyek a legkülső nem zárt héjon helyezkednek el. Kivételt képeznek a nemesgázok, melyek legkülső héja is zárt, így az anyagokkal nem lépnek kölcsönhatásba, ezért inert gázoknak nevezzük őket.

Az anyagban a szabadelektronok száma határozza meg, hogy az adott anyag vezetőként, szigetelőként esetleg félvezetőként fog viselkedni.

Nagy energiasűrűségű nyaláb esetén úgy tudjuk növelni a szabadelektronok számát, hogy a már meglévő szabadelektront gyorsítjuk egy vagy több fotonnal. Az így keletkező többlet energiát egy kötött elektronnak átadva az kiszabadul a kötésből és szabadelektronná válik. Ezzel a módszerrel egyre több szabadelektront kapunk. A folyamatot a 7. ábrán láthatjuk.



7. ábra: Az elektronsokszorozó folyamat sematikus ábrája [5]

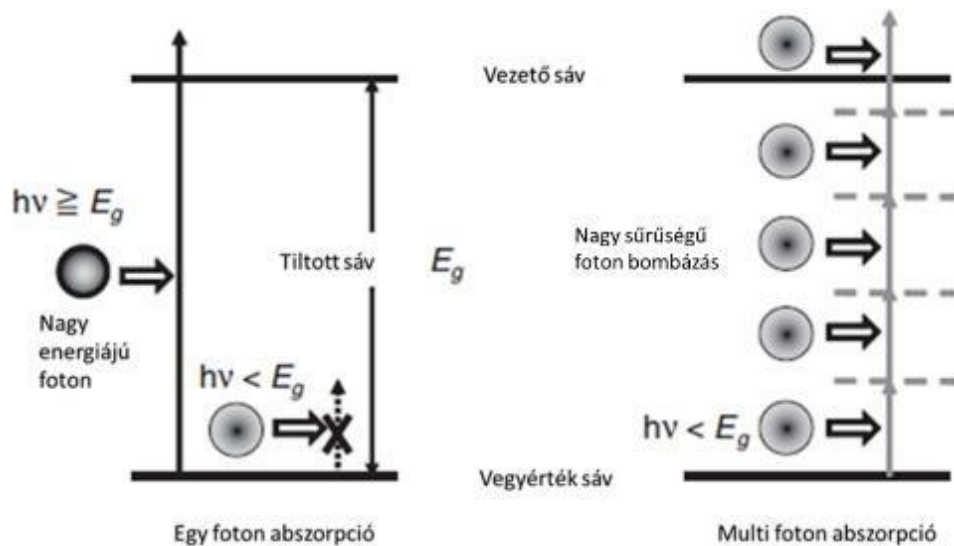
2.2.7. *Multifoton-anyag kölcsönhatás [5]*

A jelenségnek azért van fontos szerepe, mivel ez csak az ultrarövid impulzusú lézerek esetében jön létre és lehetővé teszi az optikailag átlátszó anyagok megmunkálását is.

Az elektron egyfotonos abszorpciója a lineáris elnyelődés, ilyenkor a nyaláb elnyelődik, az abszorbeálódott foton növeli az elektron energiaszintjét és a vegyértéksávról a vezetési sávba kerül, ezzel pedig megváltoznak tulajdonságai, vezetővé válik.

Ha azonban a kibocsátott foton energiája kisebb, mint az anyagra jellemző tiltott sáv energiájának értéke, akkor az elektron nem veszi át a foton energiáját.

Nagy energiasűrűségű nyaláb esetében a fotonok az anyagba hatolva az elektron egyszerre több foton energiáját is elnyeli, így az elektron elegendő energiához jut, ezáltal a vezetési sávba kerül, ezt a folyamatot szemlélteti a 8. ábra is.



8. ábra: multifoton kölcsönhatás sematikus ábrája [5]

A multifoton- anyag kölcsönhatás esetén akkor lehetséges a megmunkálás, ha a teljesítménysűrűség elég magas.

Már a pikoszekundumos lézerek is alkalmasak arra, hogy mikro és nanostruktúrákat hozzunk létre szilárd anyagokon, többnyire fémeken. Az ilyen struktúrák létrehozásában fontos szerepe van a lézer hullámhosszának az impulzusnak és a fókuszának is.

Egy viszonylag új, azonban nagyon ígéretes kutatási terület a femtoszekundumos lézerekkel létrehozott mikro-, és nanostruktúrák létrehozása fémeken.

„Az ultrarövid lézersugaras felületkezelések során nanostruktúrák létrejöttét tapasztalták, amelyet elneveztek lézer indukált periodikus felületi struktúrának (LIPSS).”

2.3. Alumínium felületén a LIPSS képződése [5]

A felületkezelések egy úgy irányát a LIPSS-ek, vagyis a lézer indukált periodikus felületi struktúrák létrehozása jelenti. Ezek a nedvesítésre sokkal kedvezőbb hatással bírnak, mint a hagyományos mechanikai felületkezelések.

Ilyen nanostruktúrákat piko-, és femtoszekundumos lézerekkel lehet előállítani, a megfelelő paraméterek pontos beállításával. Azonban mégis a femtoszekundumos lézer választás bizonyul a célra megfelelőbbnek, mivel a rövid behatási idő miatt a hőhatási zóna elhanyagolható és a multifoton abszorpció javítja az abláció hatásfokát.

A LIPSS képződésekre számos elmélet született, ám minden kétséget kizáróan még egyiket sem sikerült igazolni. A keletkezett struktúrákat két nagy csoportba oszthatjuk:

- a kis térbeli frekvenciájú (LSFL: low spatial frequency),
- nagy térbeli frekvenciájú (HSFL: high spatial frequency).

Az említett struktúrák kialakulását befolyásolja a lézernyaláb polarizációja, tehát a LIPSS orientációja a nyaláb polarizációjához képest lehet merőleges vagy párhuzamos.

A LIPSS képződést leginkább befolyásoló tényezők:

- a nyaláb hullámhossza,
- az anyag felülete,
- a polarizáció,
- a nyaláb beesési szöge,
- az impulzusok száma,
- az energiasűrűség,
- a nyaláb pásztázási sebessége.

A szakirodalmakat áttekintve ez irányú kutatás néhány fontosabb állomását elméletét szeretném bemutatni az alábbiakban:

A struktúrát először Birnbaum fedezte fel még 1965-ben. Ezek közül az egyik legelfogadottabb elmélet Sipe nevéhez fűződik, eszerint a felületen szóródó elektromágneses hullámok interferenciája hozza létre a struktúrát. Matematikailag a Fourier transzformációval írható le.

A leírás alapjául a hullámszámvektort veszi:

$$\vec{k} = (k_x, k_y) \quad (1).$$

Valós térben adja meg a kialakuló periodikus felületi struktúrák irányát és hullámhosszát

$$\lambda = 2\pi / k \quad (2).$$

Az elmélet szerint a struktúra kialakulása közben a nyaláb térben inhomogén energia elnyelődése jön létre, melynek nagysága arányos a határfok (η) és a hullámszám vektor ($\vec{k}$) végpontjában mért felületi érdesség (b) amplitúdójának szorzatával: $\eta(\vec{k}, \vec{k} + i) \times |b(\vec{k})|$.

$\eta(\vec{k}, \vec{k} + i)$ hatékonysági tényező határozza meg, hogy az érdesség milyen mértékben vezet az inhomogén energia elnyelődéshez $\vec{k}$ végpontjában.

Az elmélet szerint ott keletkeznek a felületi struktúrák ahol az elnyelődés maximuma van. A kísérletek részben igazolták az elmélet helyességét, azonban előfordulnak LIPSS-ek olyan helyeken is ahol az elmélet szerint nem fordulhatnak elő.

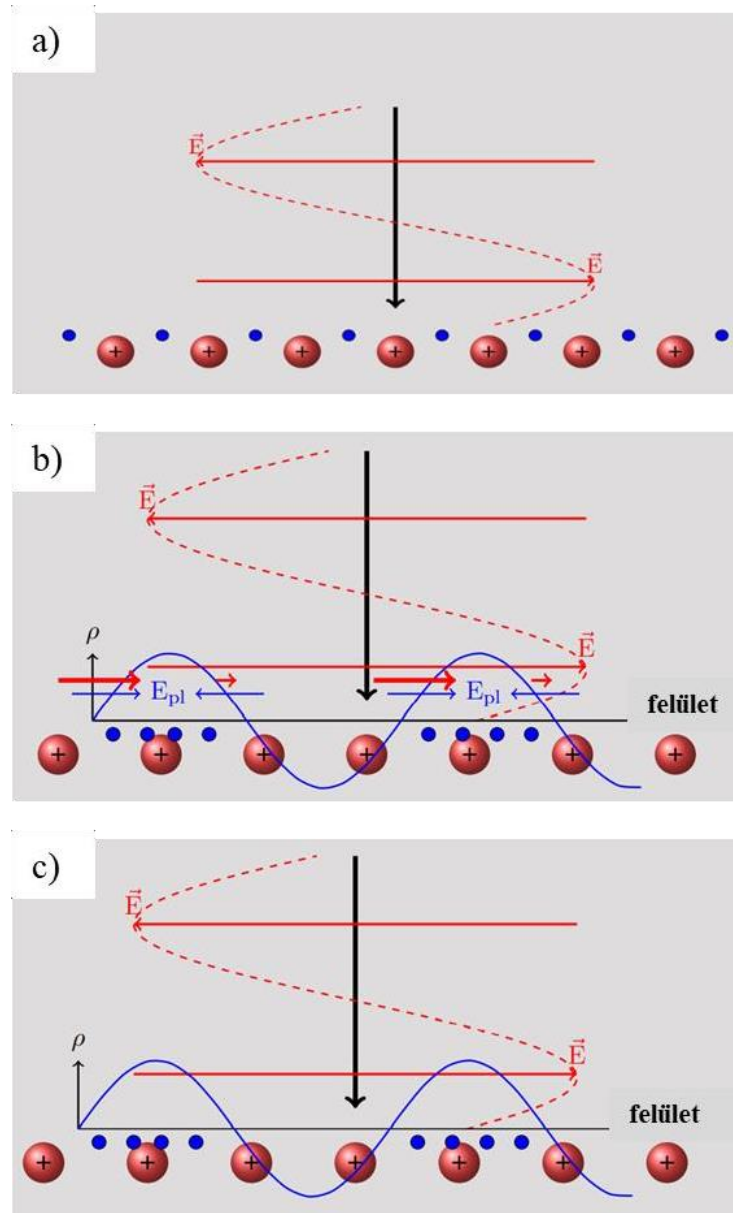
Ezen okból szükség volt az elmélet továbbfejlesztésére, így jutottak arra a feltételezésre, hogy a LIPSS létrejöttét a felületi plazmon- polariton kölcsönhatások is befolyásolják.

Ehhez feltételezték, hogy a fémekben a kis térbeli frekvenciájú hullámok (LSFL) a sugárzásból és a felületi plazmon- polariton kölcsönhatásból tevődik össze.

Ez arra az esetre alkalmazva amikor a lineárisan polarizált impulzus Θ beesési szöggel érkezik a fém felületére, a LIPSS periódusa Λ a gerjesztett plazmon- polariton kölcsönhatása és a lézernyaláb miatt. Az egyenletek a következők:

$$\Lambda = \lambda \eta \pm \sin\theta \text{ és } \eta = \operatorname{Re} \left(\sqrt{\frac{s}{s+1}} \right) \quad (3),$$

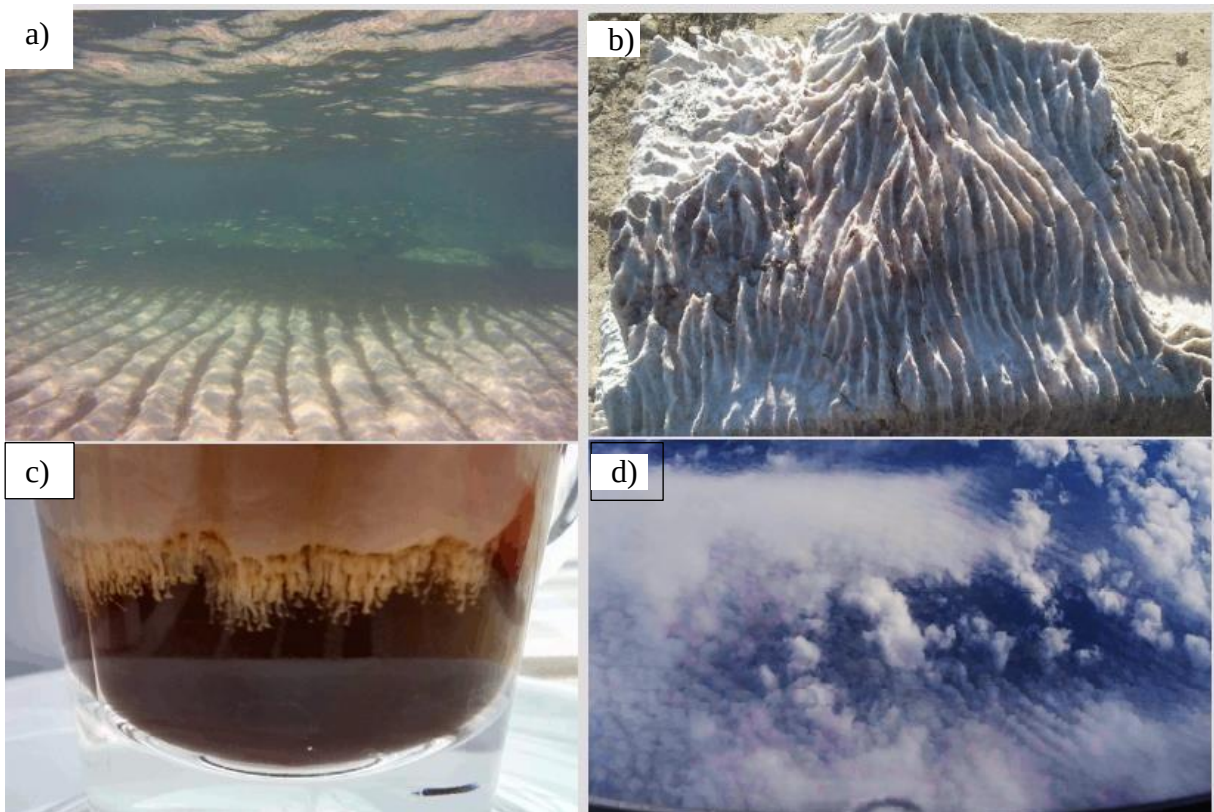
ahol: λ a lézernyaláb hullámhossza, η a felületi plazmonokra hatással lévő levegő-anyag határfelület effektív törésmutatójának valós része, ε a fém dielektromos állandója. Femtoszekundumos lézerek alkalmazásánál a szóródó sugárzás, a felületi plazmonok és az effektív törésmutató is változhat.



9. ábra: LIPSS keletkezése felületi plazmon interferencia magyarázatával [7]

Az anyagban a pozitív és negatív töltések a rácsszerkezetben meghatározott rendszerben helyezkednek el külső befolyásoló tényező nélkül (9. ábra a) rész). Ha azonban a felületet lézernyaláb éri, az elektromos térerősség a töltéseket, azon belül is a negatív töltésű elektronok elhelyezkedés megváltoztatja. Mivel az elektromos térerősség maga is hullámként viselkedik, ezért a plazmonokkal kölcsönhatásba lép, így kialakul közöttük az interferencia. Mint ahogy a 9. ábra b) részén is látható az elektronok azon a helyen helyezkednek el sűrűbben, ahol a térerősségnek maximuma van. Ahol a térerősségnek minima van, ott a rácspan nem lesz elektron.

A kialakult szerkezet ebből adódóan egy hullámhegyekből és völgyekből álló nanostruktúra lesz, amely már jó nagyítás esetén (kb. 25X-ös) fénymikroszkóppal is megfigyelhető (9. ábra c) rész). Az ábrákon ρ -val jelölt tengely az elektronsűrűséget jelenti a felület mentén, így látható, hogy a felület mentén periodikusan változik az elektron sűrűség a hullámhegyeknek és völgyeknek megfelelően. A természetben is megtalálható a struktúra valamint mesterségesen is létre hozhatjuk azt. A természetben előforduló példákat a 10. ábrán találunk: a felhők elhelyezkedése, a tengerfenéken a homok, különböző sziklás képződmények, stb..



10. ábra: természeti példák LIPSS-re a) tengerfenék; b) szikla; c) kávé; d) felhők [7]

2.4. A lézer indukált periodikus felületi struktúra alkalmazási területei

Az előzőekben láthattuk, hogy a struktúra létrejöttére nincs egységesen elfogadott magyarázat, akkor mégis mire jó a LIPSS?

Az alábbiakban magyarázatot adok rá, hogy miért bír kiemelt jelentőséggel napjainkban és miért folynak intenzív kutatások mind a létrejöttét, mind az alkalmazási lehetőségeit tekintve.

Lézeres felületkezelést, megmunkálást leggyakrabban az orvosbiológiai eszközök gyártásánál, kutatásában alkalmaznak. A másik igen nagy terület, amely nagy pontosságú eszközöket igényel az optika, elektronika.

Mérnöki szempontból számunka a tribológia, a kopásálló felületek létrehozása kiemelten fontos. Emellett alkalmazzuk a fémszínező, ill. hidrofil és hidrofób felületek létrehozó tulajdonságát is.

A tribológiai alkalmazása a járműiparban bír kiemelt jelentőséggel. A kenés javítható lézeres megmunkálással, ezzel pedig anyagot takarítunk meg, valamint nincs szükség környezetszennyező kenőanyagokra, mégis tartós és megfelelő mértékű kenés érhető el.

A fémek színezésére akkor van szükség, ha azok felszínének optikai tulajdonságait szeretnénk megváltoztatni anélkül, hogy a fém alapvető szerkezete megváltozna. A színezéshez a lézernyalábnak és a fém felületének egy Θ szöget kell bezárnia. A kialakuló optikai tulajdonságok attól függenek, hogy milyen Θ szögben érkezik a nyaláb a fém felületére. Mi ebből annyit érzékelünk, hogy a munkadarabot a fény felé fordítva színesnek látjuk. Különleges esetekben jó szolgálatot tehetnek az optikai rácsok, melyek különbözőképpen térítik el a nyalábot.

A színezést többnyire kódolásra, pl.: CD lemezek, jelölésre vagy egyéb fém felületek díszítésére használjuk.

A legfontosabb alkalmazási területét mégis a ragasztókötések, öntisztuló felületek létrehozása alkotja [10, 13].

A LIPSS kedvezően módosítja a felület nedvesítési tulajdonságait. Mint minden technológia, pl.: ragasztás, forrasztás, hegesztés, stb... elvégzése előtt célszerű a felületet megtisztítani az optimális eredmény elérésének érdekében. Az öntisztuló felületek létrehozásához a munkadarab felületét módosítani kell, azt hidrofób tulajdonságúvá kell tenni, így a rákerülő szennyeződések és folyadékokat is taszítani fogja.

Amennyiben a felületkezelésekhez nagy energiasűrűségű lézerberendezéseket választunk, úgy különböző felületek, bevonatok hozhatók létre a kívánt alkalmazás szerint.

Jelen dolgozat célja a felület nedvesítés javítása LIPSS-ek hatására.

A vizsgált anyagom egy alumínium lemez, ez azért különleges mivel a szakirodalomban nagyon kevés adat áll rendelkezésre alumínium felületen létrehozott LIPSS-ekről. Ami pedig van, az sem túl meggyőző eredmény.

Belátható, hogy eltérés van az acélok és az alumínium szerkezete között és ez az eltérés elegendően nagy ahhoz, hogy ugyanaz a folyamat változatlan paraméterekkel más és más mértékben megy végbe. Éppen ezért a továbbiakban az alumínium felületén kialakuló LIPSS-ek érdekes kutatási témát adhatnak.

Az alumínium esetében teljesen más paraméterek mellett kellett keresnünk a megjelenő nanostruktúrákat, mint egy acél esetében, de mint később látható nem lehetetlen az előállításuk.

A szakirodalomban fellelhető mikroszkópos képek alapján sikerült azonosítanom a megjelenő struktúrákat. Így amikor sikerült a felületen létrehozni a LIPSS-eket, elkezdhattuk vizsgálni a felület nedvesítését.

De lássuk mindez miért fontos számunkra. Az alumínium szerkezeteket többnyire az építőipar használja nagyobb mennyiségben, azonban az élet minden területén fellelhető különböző formában.

Ahhoz, hogy a szerkezeteket egymáshoz rögzítsük a felhasználáshoz képest kell megválasztanunk azt a rögzítési módot, amely a szerkezetet rögzíti, megfelelő kötőszilárdság érhető el, ugyanakkor, ha a szerkezet azt kívánja bizonyos fokú elmozdulás lehetséges.

A vizsgált kötés a ragasztókötés. Itt csak a kötőszilárdságra van szükség.

A kötés szilárdsága pedig a LIPSS-ek alkalmazásával növelhető.

Egy szimplán felülettisztított alumínium lemezen a folyadékcsepphez tartozik egy bizonyos értékű szétterülés a felületen. Ezt a mutatószámot nevezzük peremszögnek (Θ). Kísérletek kimutatták, hogy a nedvesítés mértéke javítható acélok esetében, ha nanostruktúrákat hozunk létre a felszínen.

Ugyanezt értük el alumínium esetében is. Azonban a nedvesítés mértéke nagyban függ a felülettel közlő energia nagyságától, a beesési szögtől, a hullámhossztól, valamint a frekvenciától. A vizsgálathoz azonban nem elég, ha csupán foltokat helyezünk el egymás mellé, kiterjedt LIPSS felületet kell létrehozni. Ennek módjáról még a későbbiekben lesz szó.

A kiterjedt felületre egy vízcseppet cseppentve azt látjuk, hogy a teljesítménysűrűséget csökkentve adott frekvencián javulnak a nedvesítési tulajdonságok, vagyis egyre kisebb teljesítmény hatására csak a felület módosul, egyre kevesebb energiát közlünk a

munkadarabbal, így már a fotonoknak nincs ahhoz elegendő energiája, hogy az anyag belsejébe jussanak.

Nekünk éppen ez a célunk, épp csak a felszín megmunkálása. A különböző teljesítmények mellett létrehozott LIPSS-ek egyre jobb nedvesítést hoznak létre, tehát a peremszög egyre kisebbé válik, míg végül közel 0 értékre csökken.

Ez érték adja a legjobb nedvesítést, tehát egy ragasztókötésben emellett a peremszög érték mellett szinte teljesen elterül a ragasztó anyag és „tökéletes” ragasztást hozhatunk létre.

Azonban mindez természetesen csupán elméletben lehetséges, hiszen mindig van olyan külső befolyás amely megakadályozza az elméleti értékek elérését, azonban azok igen jól megközelíthetők [5].

Azonban egy ilyen mikrostrukturált felületen is nagyszilárdságú ragasztókötés jöhet létre. Az ilyen és ehhez hasonló innovatív megoldások a közeljövőben kiegészítik, sőt egyes esetekben teljesen le is válthatják a mechanikai technológiákat. Ezen technológia előnye, hogy gyors, gazdaságos, ipari méretekben is alkalmazható, kevés előkészületet igényel, csupán a felületet kell megtisztítani azonban ez a folyamat is gépesíthető.

Ha van a technológiának előnye akkor hátránya is van, ez egy drága beruházás, helyigényes és rendszeres karbantartást igényel, esetenként a csere alkatrészek drágák lehetnek és sok idő a szállítás. Azonban ez a technológia a jövő, az iparra is kiterjeszthető, így gyorsabb és megbízhatóbb alkatrészek állíthatók elő az ipar számára.

3. CÉLKITŰZÉS

A dolgozat célja a LIPSS megismerése és létrehozása alumínium felületen. Majd a későbbi nedvesítés mérésekhez egy olyan paraméter beállítást megtalálni, amivel megfelelő minőségű LIPSS felületek hozhatók létre.

Mi számít jónak? A nyaláb behatolási helyén a hatásfolt nem túl mély, inkább csak felületi struktúrát hoz létre.

A nyaláb behatolási helyén a folt széle nem égett meg és nincs fröccsenés sem a minta felszínén sem magában a létrehozott struktúrában. A hőhatási övezet ne legyen túl nagy kiterjedésű. Tehát a felületet épp csak annyi energia érje, amivel a felszíni mintázatot létre tudjuk hozni. LIPSS-ekre jellemző vonalak legyenek minél hosszabbak és egybefüggőek, mivel így egy fénymikroszkópos vizsgálat esetén is biztosak lehetünk benne, hogy a létrehozni kívánt struktúrát látjuk.

Míg az acélok esetében a tanulmányok szerint könnyebb a létrehozás, addig az alumínium esetében a szerkezeti adottságból jóval nehezebb.

A dolgozatomban bemutatom, hogyan és milyen paraméterek mellett sikerült a nanostruktúra létrehozása az alumínium felületén.

4. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

4.1. Alumíniumlemez bemutatása [4]

A kísérlet alapjául szolgáló alumínium lemezeket az Alukonstrukt Építőipari Szolgáltató és Kereskedelmi Kft. biztosította. A lemezek pontos anyagösszetételét spektroszkóppal megvizsgálva az alábbi eredmény adódott.

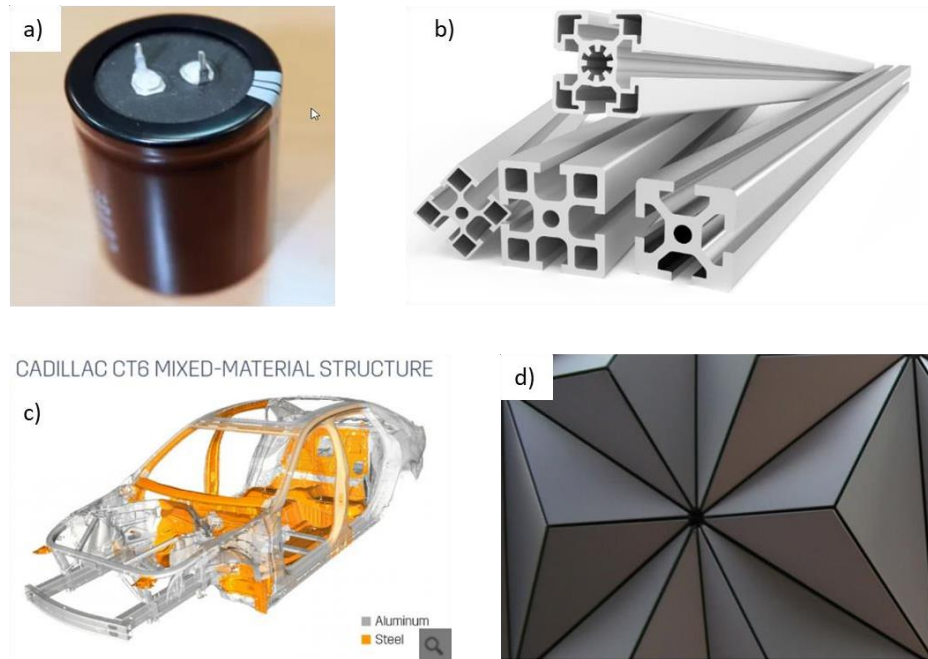
1. táblázat: Vizsgált alumínium összetétele

Al:	Si:	Fe:	Cu:	Mn:	Mg:	Zn:	Cr:	Ni:
99,5	0,114	0,210	0,0018	0,0039	0,0024	0,0058	<0,0001	<0,0003
Ti:	Be:	Ca:	Li:	Pb:	Sn:	Sr:	V:	Na:
0,0274	0,0001	0,0015	<0,0001	<0,0006	<0,0004	0,0001	0,0171	0,0013
Bi:	Zr:	B:	Ga:	Cd:	Co:	Ag:	Hg:	Sb:
<0,0015	0,0056	0,0029	0,0115	0,0019	<0,0010	0,0015	0,0061	0,0059
P:	Ce:	La:						
0,0022	<0,0006	0,0015						

Ezáltal meg lehetett állapítani az alumínium besorolását. Az alumínium anyagok közül nagy mennyiségű ipari felhasználása van a 1050-es ötvözetűeknek. Ez egy jelentős alumínium típus, ami széleskörűen alkalmazott. Következőkben ezt részletezem, mert dolgozatomban is ilyen alapanyagot használtam.

A spektroszkópiai eredményből kiolvasható, hogy az ötvözet 99,50%-ban tartalmaz alumíniumot és ötvöző anyagokat mindössze 0,50%-ban. Legnagyobb tömegszázalékban megjelenő ötvözők a vas (Fe 0,210%) és a szilícium (Si 0,114%), a többi ötvöző sokkal kisebb arányban jelenik meg ezért ezek hatása az előbbi két fémhez viszonyítva kevésbé érvényesül.

Ilyen összetételű alumínium ötvözeteket széles körben alkalmazzák az ipar minden területén, mint az elektrotechnika, tükrök, építőiparban pedig az alacsony igénybevételű szerkezetekhez alkalmazzák, többnyire nyílászárók gyártásához, néhány példát mutat be a 11. ábra.



11. ábra: az alumínium néhány alkalmazási területe: a) kondenzátor; b) ALU-profil; c) járműgyártás; d) homlokzat [12,13,14,15]

Bár az alumínium ötvözetek széleskörben alkalmazhatók, ennek ellenére szükség van a felületek kezelésére, megmunkálására, hogy szerkezeti anyagokként beépíthetők legyenek.

Önmagában egy alumínium lemez vagy profil nem alkalmas szerkezetek, gépek, alkatrészek létrehozására.

Ehhez először meg kell határozni, hogy az adott ötvözetet milyen célra szeretnénk felhasználni. Ehhez az alkalmazási területhez kell kiválasztanunk a megfelelő felületkezelést. A felhasználáshoz különböző kötéseket alkalmazunk, hogy a szerkezet az általunk meghatározott célra alkalmas legyen.

A felületek közti kötések típusai:

- oldható, pl.: csavarozás, ragasztás,
- oldhatatlan: hegesztés.

A lemezek közötti kötés létrehozásának egyik lehetősége a hegesztés, amennyiben az alumínium ötvözet megfelelő arányban tartalmazza a magnéziumot, mint ötvözőt.

Fontos a szerelhetőség is, mivel egy szerkezet összeállítása során különböző szerelési technológiákat alkalmaznak egyidejűleg. A lemezek közti kötés egy másik fontos technológiája a ragasztás. A ragasztás általi kötés a többi technológiával ellentétben előkészületet igényel. Mivel a kötés erőssége erősen függ a felület minőségétől. Azonban, ha a lemezek megfelelően elő vannak készítve, akkor igen erős kötés alakulhat ki a két alkatrész között.

A kötés típusa a felhasználástól függ, a járműiparban az alumínium lemezek közti kötésekre használnak ragasztást és hegesztést egyaránt.

Ez attól függ, hogy milyen irányú és mekkora nagyságú terhelés éri az adott szerkezetet, illetve, hogy mennyire erős és tartós kötést kell kialakítanunk.

Ha igazán tartós kötést szeretnénk létrehozni, akkor egyidejűleg alkalmazhatjuk a ragasztást és a hegesztést.

A vizsgált alumínium darab 2 mm vastag, ez azért fontos, mivel a kísérleti berendezésnél a fókusztávolságot úgy kellett beállítanom, hogy a fókuszpont a minta felületére essen, ne pedig alá vagy fölé.



12. ábra: Az alumínium lemez a mikroszkópos vizsgálat előtt

A mintákat egy alumínium táblából vágtuk 24 mm x 73 mm méretre, összetételét pedig már korábban spektrométerrel meghatároztam. Ezután a darabok felületét alkohollal tisztítottam meg a felületi szennyeződésektől és az olajtól.

Majd a lézerberendezés tárgyasztalára helyeztem, itt először jelzőfényvel meghatároztam azt a területet ahová a mintát készítettem. Itt az volt a lényeg, hogy ne lógjon le a mintáról és ne a darab szélére essen, mivel így adatokat veszíthetek amennyiben nem épek a foltok. Az elkészített minta látható a 12. ábrán.

4.2. Alkalmazott rendszerek és mérési eszközök

4.2.1. Spektrométer [4]

A LIPSS felületek létrehozásához és a felületek vizsgálatához a Neumann János Egyetem Dióda Lézer Centrumában található berendezéseket használtam.

A vizsgálat első lépéseként meghatároztam az alumínium lemez összetételét spektroszkóppal.

A mérést egy Fourier – transzformációs infravörös spektroszkóppal végeztem, a berendezés a 13. ábrán található.

A spektroszkóp alapja a Michaelson interferométer. A működésének alapja, hogy a beeső fényt két sugárra bontja, majd az egyik sugár egy álló, a másik sugár egy mozgó tükörről verődik vissza, így köztük optikai útkülönbség jön létre. Majd a két sugár ismét egyetlen sugárrá áll össze, ez a sugár adja a jelet. Mért jel az optikai útkülönbség függvényében $I(x)$. A detektorra jutó fényintenzitás a frekvenciafüggvényében a spektrum.

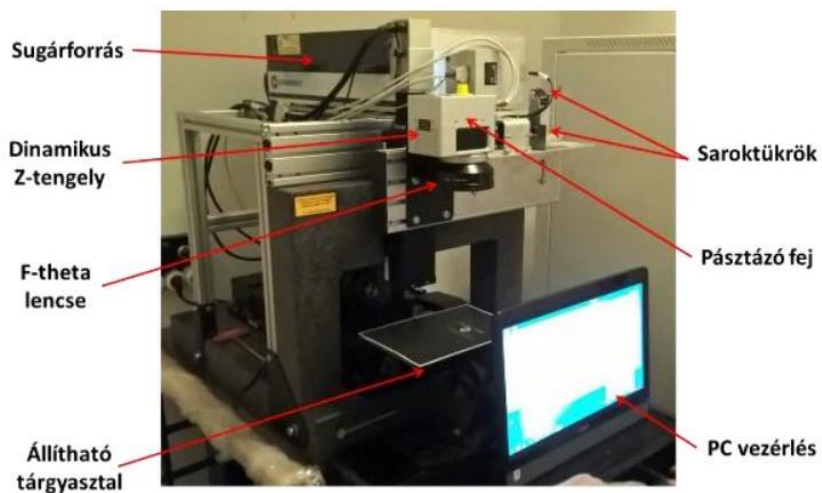
A spektrum Fourier- transzformáltja egy monokromatikus fényforrás interferogramja egy cosinus függvény. Különböző spektrális eloszlásokhoz mérésére egy külön interferométer méri az optikai útkülönbséget. He-Ne lézer esetén az interferogram tisztán cosinus függvény. Az infravörös detektor akkor képes új pont felételére, ha a lézerdetektorra eső fényintenzitás 0, ez pedig csak akkor fordulhat elő, ha az optikai úthosszkülönbség a fél hullámhossz egész számú többszöröse. Kisegítő interferométer is található a berendezésben, ennek szerepe az, ha fehér fénysugár jut a detektorra az interferogramja éles maximumot mutat. A maximum helye beállítható ezt pedig felhasználjuk a mérés indításához.

Ennek eredményét már korábban ismertettem. Ezt követően meghatároztam tolómérő segítségével a lemezek méretét. Majd következett maga a felület létrehozása a lézerrel.



13. ábra: Fourier- transzformációs infravörös spektroszkóp (FOUNDRY- MASTER PRO)

4.2.2. Femtoszekundumos lézerrendszer [5]



14. ábra: kísérleti elrendezés [5]

A LIPSS -eket egy Coherent Monaco típusú lézerberendezéssel hoztam létre. A kísérleti berendezés összeállítását a 14.ábra mutatja be.

A berendezés sugárforrása egy dióda gerjesztésű szállezer, az impulzus hossza pedig 277 fs és 10 ps között változtatható. Az impulzus ismétlési frekvenciája 188 kHz és 50 MHz között állítható. A nyaláb hullámhossza $1035 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$. A sugárforrás átlagos

teljesítményének maximális értéke 60 W. Az általam vizsgált 10 MHz-es frekvencián ez az 6 μ J, módus TEM00, M2 értéke pedig 1,05. A nyaláb divergenciája $<1,0$ mrad, a fókuszálatlan nyalábátmérő $2.7 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. A kísérleti elrendezés az alábbi ábrán látható.

Ezen belül az én kísérletemhez használt összeállítást az alábbi ábra mutatja be. A sugárforrásból kilépő nyaláb a saroktükörrre jut és ez reflektálja a nyalábot a pásztázó fejhez.

A pásztázó fejben két galvanomotoros szkennner van, ennek a tükrei a nyalábot egy F- theta lencsén keresztül fókuszálják a munkadarab felszínére. A pásztázó fejben a fej előtt egy optikai elemmel a fókusz távolság dinamikusan állítható -30 mm és $+30 \text{ mm}$ között. A berendezés pásztázási sebességét is állíthatjuk $0,0001 \text{ m/s}$ és 30 m/s között. A lézer kezeléséhez tartozó programban a burst módot állítottam be, ezzel szabályozható az impulzusok száma. Ez esetben azért volt fontos, mivel a mintán a foltokat különböző számú impulzusokkal hoztam létre.

4.2.3. Fénymikroszkóp

Az elkészített mintát egy Zeiss Axio Imager M.2M fénymikroszkóppal vizsgáltam, amely a 15. ábrán szerepel.

A mintákat a felületkezelés másnapján végeztem el, így oxidáció még nem jelent meg a felületen. A foltok mélységétől függően készítettem el az ábrákat. Amikor csak felületen volt jelen a LIPSS, akkor nem volt szükség különleges beállításokra az ábra elkészítéséhez. Amikor már mélyebb foltokat vizsgáltam szükség volt a Z-Stack nevű beállításra. Ez lehetővé tette, hogy a foltról szeletenként készítsem el az ábrákat, amelyek aztán egy képen jelennek meg. A szeletek vastagságát az szabta meg, hogy a teljes képet hány képrészletből rakta össze a program. A legjobb felvételek elkészítéséhez 10-15 szeletre volt szükség. Minden képre raktam méretskálát és lemértem minden folt átmérőjét, mivel erre később még szükségem volt.



15. ábra: Zeiss Axio Imager M.2M fénymikroszkóp

5. KUTATÁSI EREDMÉNYEK

5.1. Pontszerű felületkezelési kísérletek

A kísérletet foltok létrehozásával kezdtem, ezután tudtam folytatni a vonalak és teljes felületek létrehozásával. A lézerberendezéshez tartozó GUI programban először megírtam a programot, ami alapján a mintát elkészítettem. A foltokat több paraméterrel is vizsgáltam.

Először meghatároztam, hogy hány impulzussal szeretném az energiát bevinni a felületbe. Ez alapján a következő impulzus számokat vizsgáltam: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 250, 500 db. A kísérlet tervet a 16. ábra szemlélteti. Ezekből mikroszkópos vizsgálattal lehet meghatározni, hogy az impulzus számának milyen hatása van a felületre. A mintán is feltüntettem az értékeket, így könnyebben átlátható volt, hogy mely foltoknál milyen változás lép fel.

1	10	100	●	●	●
2	20	200	●	●	●
3	25	250	●	●	●
5	50	500	●	●	●

**A pontok
helyzete minden
frekvencia
esetében azonos**

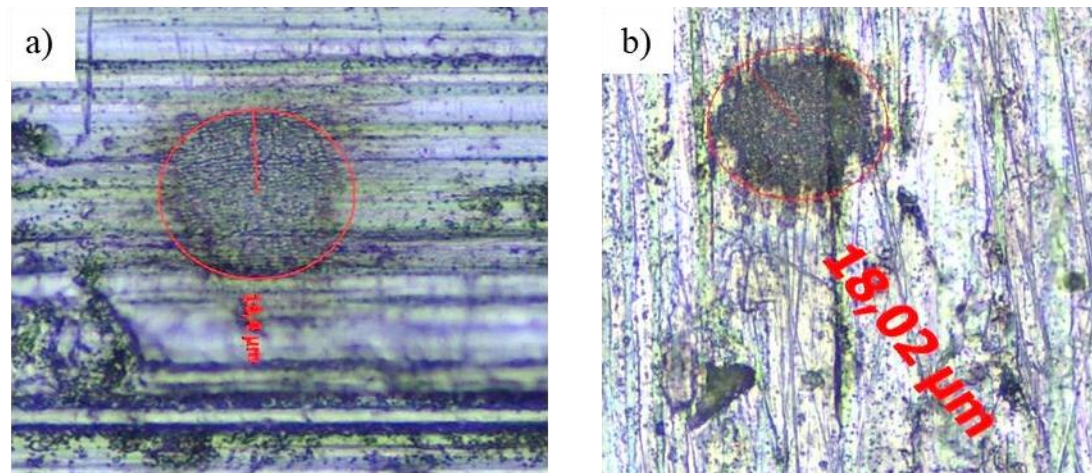
16. ábra: A foltok elhelyezkedése az alumínium lemezen

Majd meghatároztam, hogy milyen ismétlési frekvenciákon szeretném vizsgálni az adott foltokat. A lézer összes lehetséges frekvenciáján a 188 kHz-től egészen az 50 MHz-ig elkészítettem a mintákat. Ebből már meg tudtam határozni melyik frekvenciát válasszam a további vizsgálatokhoz. Az egyes frekvenciákon a teljesítményt is változtattam így kaptam az alábbi mintázatot: A teljesítményt az első vizsgálatokhoz 10% és 100% között 10%-onként változtattam. Ezt a már fent említett foltok mindegyikén vizsgáltam.

Ezen adatokból a mikroszkópos vizsgálat alapján elkezdem kiszűrni a LIPSS képződés szempontjából releváns frekvenciákat. Két megfelelő frekvenciát találtam, az egyik a 330 kHz, a másik pedig a 10 MHz. Azonban ezen a frekvencián is csak egy szűk teljesítményen találtam értékelhető LIPSS képződményeket. Ezen belül is az impulzusok száma is megszabja, hogy találtam-e LIPSS-eket. A 330 kHz és a 10 MHz esetében más- más teljesítmény közelében találtam értékelhető LIPSS-eket. Azt találtam, hogy a 10 MHz frekvencián 45%-os és 55%-os teljesítmény közelében érdemes folytatni a vizsgálatokat, míg a 330 kHz esetében ez 10% és 20% közötti teljesítmény, mivel ezen a teljesítmény szinten találtam határozott felületi elváltozásokat mindkét frekvencián.

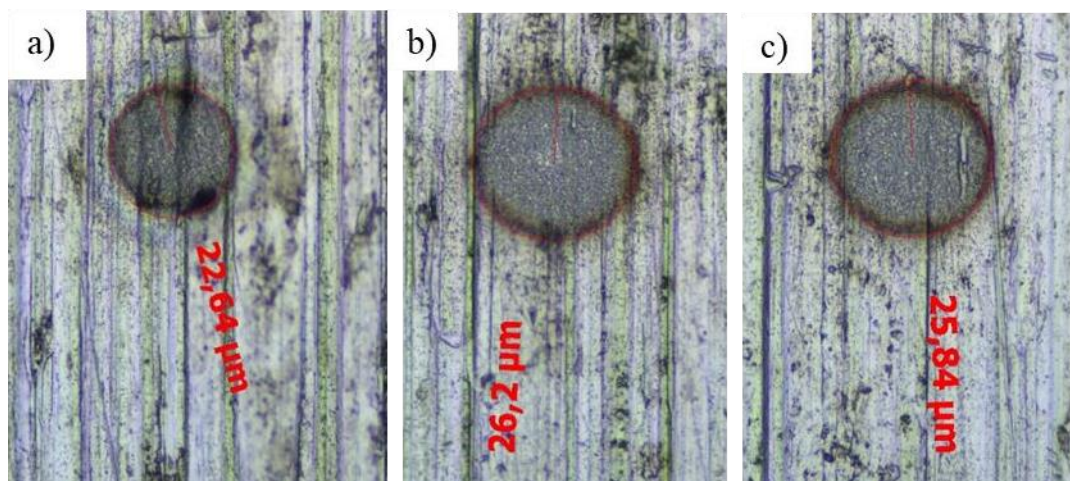
Amikor meghatároztam a vizsgálandó teljesítmény szintet következett az impulzusok hatása a foltokra frekvenciánként külön vizsgálva. Majd a teljesítményt 2,5%-onként változtattam és így megvizsgáltam az adott foltokat.

330 kHz esetében az alábbi eredményekre jutottam. Az ábra aláírásban a P-vel a teljesítményt jelöltem és százalékosan, b-vel pedig a burst-öt, vagyis az impulzus számot jelöltem, ezt pedig darabban adtam meg.



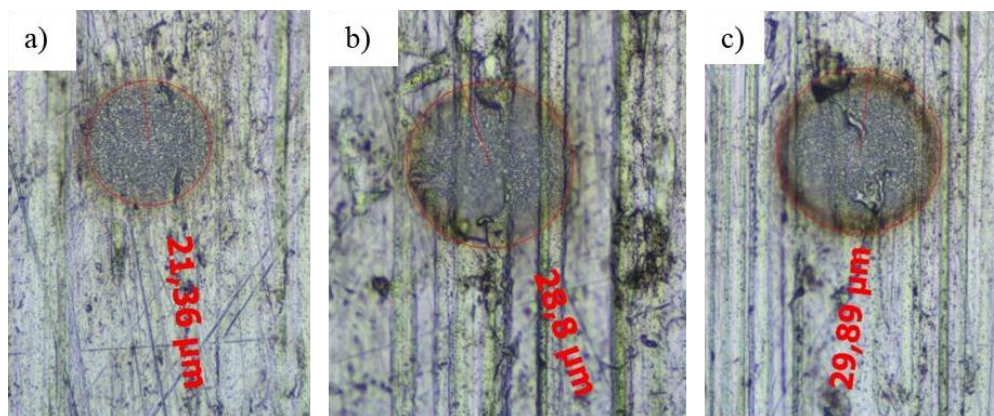
17. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata a) 330 kHz, $P = 12,5\%$ b= 20;

b) 330 kHz, $P = 12,5\%$ b= 25



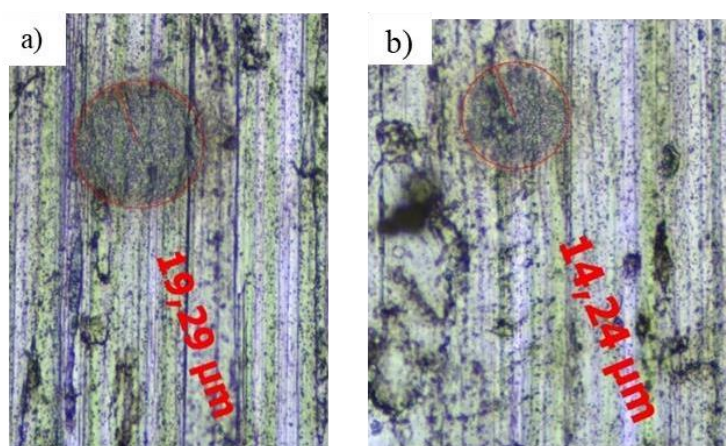
18. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata a) 330 kHz, $P = 15\%$ b= 50; b) 330

kHz, $P = 17,5\%$ b= 20; c) 330 kHz, $P = 17,5\%$ b= 25

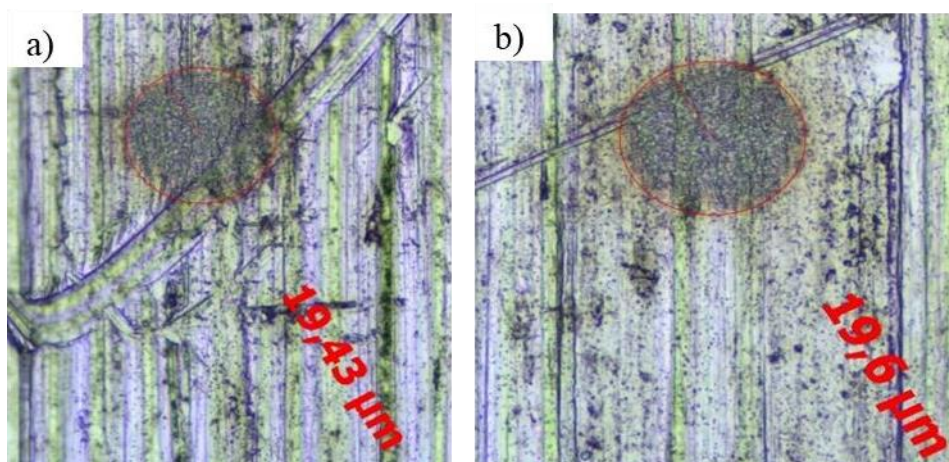


19. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata a) 330 kHz, $P = 20\%$ $b = 3$; b) 330kHz, $P = 20\%$ $b = 5$; c) 330 kHz, $P = 20\%$ $b = 1$

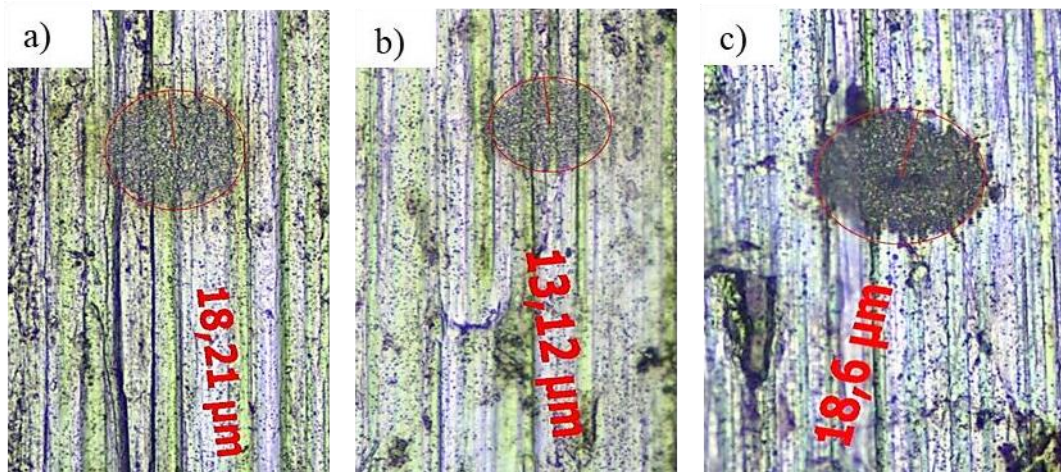
Ugyanígy a 10 MHz frekvencia eredményei a következők:



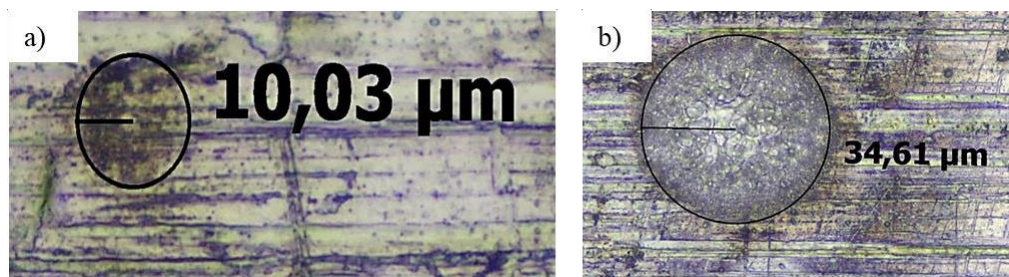
20. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata a) 10 MHz, $P = 45\%$ $b = 100$;
b) 10 MHz, $P = 47,5\%$ $b = 25$



21. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata a) 10 MHz, $P = 47,5\%$ $b = 50$;
b) 10 MHz, $P = 50\%$ $b = 50$



22. ábra: a fs-lézer nyaláb behatásainak vizsgálata a) 10 MHz, $P = 52,5\%$ $b = 50$; b) 10 MHz, $P = 55\%$ $b = 20$, c) 10 MHz, $P = 55\%$ $b = 50$



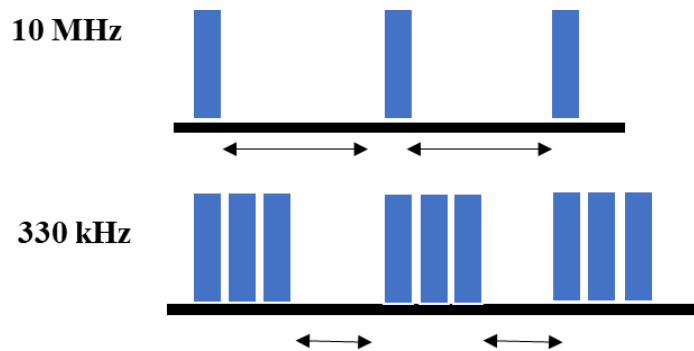
23. ábra: a fs-lézer nyaláb behatásainak vizsgálata a) 10 MHz, $P = 10\%$ $b = 3$;
b) 10 MHz, $P = 90\%$ $b = 3$

Ezek alapján belátható, hogy a két frekvencián nem azonos teljesítmények mellett és különböző impulzus számok mellett találtunk LIPSS felületeket.

A 330 kHz-es frekvencián a legjobb LIPSS felületeket 12,5% és 20% közötti teljesítményeknél találtam, illetve az impulzusok számára is maximum 50 adódott. Az e feletti értékek esetében a foltok széle a nyáláb behatolási helyének szélén egyre égettebb volt, illetve a hőhatási övezet is egyre kiterjedtebb lett, ami nem szerencsés esetben, mivel az az anyag hővezetéséből adódik. Ilyenkor a vizsgált anyag felmelegszik, szerkezete megváltozhat.

10 MHz frekvencia esetében 45% és 55% között találtam meg a LIPSS felületeket. Itt azonban már nagyobb impulzusszámmra, leggyakrabban 50, de 20 és 100 impulzusra is szükség volt, a LIPSS hatás eléréséhez. A fent bemutatott képek alapján választottam ki a számomra megfelelő impulzus számokat. Mivel 10% teljesítmény esetében még nem látszik felületi változás, 90% pedig már az anyag tönkremenetelét okozza.

A 10 MHz-es frekvencia választásának magyarázata: A lézerberendezés kezelési útmutatójából kiderül hogyan alakulnak az egyes frekvenciákhoz tartozó impulzusok és a hozzájuk tartozó energiák. Az általam vizsgált 10 MHz- hez tartozó energia 100%-on $6\text{ }\mu\text{J}$ és mindössze 1 impulzust bocsát ki a berendezés. Az alábbi ábra alapján ismertetem a 10 MHz hatását a LIPSS felületek szempontjából.



24. ábra: Impulzusok kibocsátása 330 kHz-en és 10 MHz-en

A választást az adott frekvencián kibocsátott impulzus száma, így energiája befolyásolja. 30 kHz esetén 3 impulzus hagyja el a berendezést, míg az 750 kHz-nél nagyobbfrekvenciákon már csak 1 impulzus. Az impulzus energiája 330 kHz-en $3 \cdot 26,6\text{ }\mu\text{J}$. Addig az 750 kHz feletti értékek esetén, így 10 MHz esetében is a berendezést 1 impulzus hagyja el, az energia $1 \cdot 6\text{ }\mu\text{J}$. A valóságban a frekvencia értékek esetében minimális eltérések tapasztalunk, hiszen ezek csak elméleti értékek, a valós értékeket befolyásolja a lézer közegének anyaga, a gerjesztés módja valamint a fellépő veszteségek.

Az ábra alapján látható hogyan hagyja el a berendezést az impulzus. 330 kHz esetében 3 impulzus, ezt tekintjük egy impulzusként, ezt egy impulzusnyi (valójában 3) szünet, majd ismét 3 impulzus kibocsátás. 10 MHz frekvencián 1 impulzus kibocsátás, majd egy impulzusnyi szünetet követően ismét 1 impulzus kibocsátás és így tovább. Tehát azt találtam, hogy mind 330 kHz frekvencián, mind 10 MHz frekvencián létrejöttek a LIPSS-ek. Azonban a fenti magyarázatból látszik, hogy 10 MHz esetében könnyebb szabályozni a kibocsátott energiát, így szabályozottabb körülmények között tudtam a felületeket létrehozni és számszerűen tudtam az adott frekvencia esetében a választott energia százalékon mekkora energiát értünk. Az ideális nedvesítés eléréséhez a 10 MHz-es frekvenciát választottam. Az ezen a frekvencián létrejött foltok esetében jobb felületeket, vagyis olyan felületeket kaptam ahol a foltban is megtalálható a LIPSS, nemcsak a foltok szélén. Kisebb a hőhatás övezet és kevésbé ég meg a folt széle. Nem utolsó sorban sokkal kontrollálhatóbb a

folyamat lejátszódása a 10 MHz esetében, ahol nem lépnek fel egyéb a lézer sajátosságaiból adódó folyamatok.

5.2. 10 MHz-es frekvenciával készített hatásfoltok vizsgálata

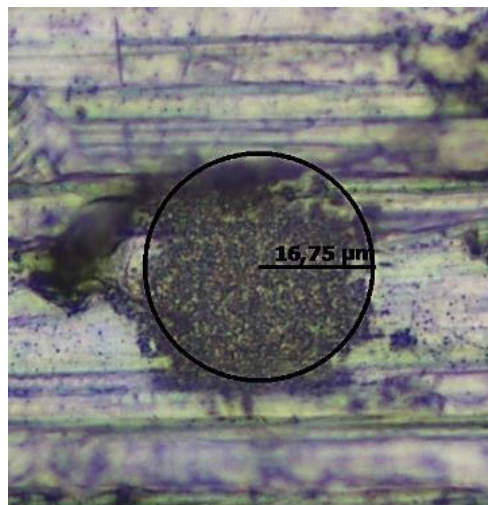
Miután kiválasztottam a tovább vizsgálandó frekvenciát, a korábbi vizsgálati eredményből adódóan meghatároztam azt a teljesítmény tartományt amelyre leszűkíttem a vizsgálatot. Az impulzus számok változatlanok maradnak.

A teljesítményt 45% és 55% közé szűkítettem le. Ezen belül pedig 0,5%-onként változtattam így lehetőség adódik a LIPSS felületek alumíniumon való képződésének legoptimálisabb paramétereinek meghatározására.

Ilyen paraméterek mellett már jobb és kevésbé jobb LIPSS-eket láttam a felületen.

Vizsgálataim során többek közt a foltok és a nyaláb teljesítményének kapcsolatát, valamint a foltok és az impulzusok száma közti kapcsolatot vizsgáltam.

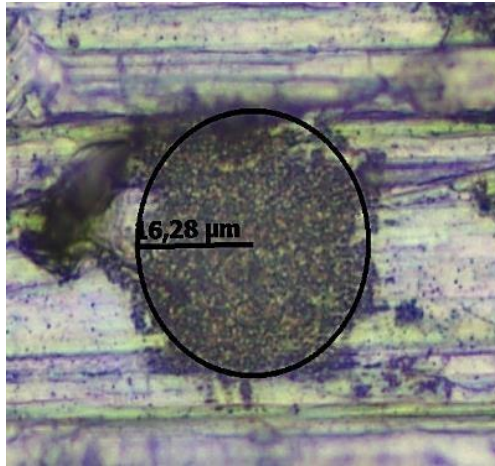
Olyan mintákat választottam a vizsgálatához, amelyek nem égett és mély foltok, így biztosítottam, hogy a kiválasztott képeken be tudjam mutatni a LIPSS jelenségét.



25. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 45%

impulzusszám: 50

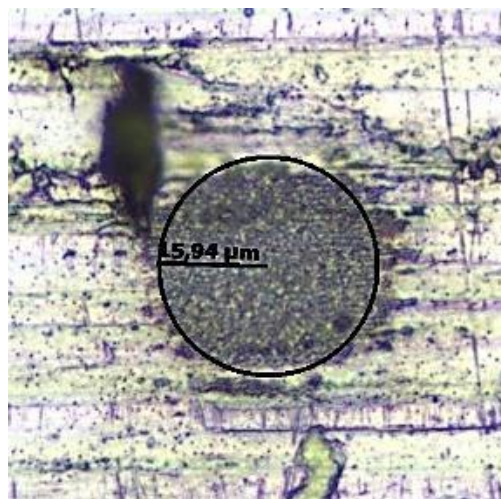
Látható, hogy az 50 impulzus jól kivehető struktúrát hozott létre, a folt szélén nincs égés nyoma, az egész felület LIPSS felület, a hőhatási övezet nem kivehető. Ideális felületet kaptam ezen paraméterek mellett.



26. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 45%,
impulzusszám: 500

Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb az impulzusszám, annál rosszabb minőségű felületet kapunk. Megjelenik az égés a folt szélén, kiterjedt hőhatás övezetet láthatunk, nem a felület megmunkálása történik, sokkal inkább a mélyebb rétegek eltávolítása az anyagból. Mind az anyag felszínén, mind a folton belül megjelenik a fröccsenés.

Azonban kisebb teljesítményszint mellett jól látható LIPSS-eket kaptam még 500 impulzus mellett is, számottevő felület változás nélkül. Az ábrán látható elmosódás a felület hibájából adódik nem a megmunkálásból keletkezett.

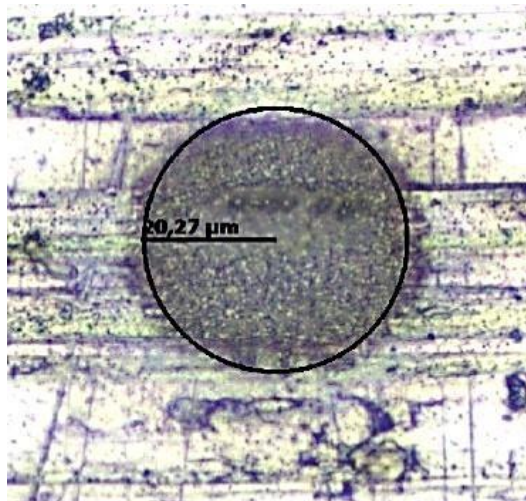


27. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 46,5%
impulzusszám: 50

A következő említésre méltó teljesítmény a 46,5%. A 27. 28. és 29. ábra is emellett a teljesítmény mellett készült.

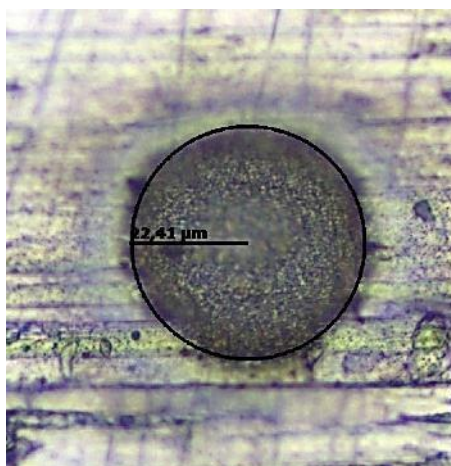
Jól látható az impulzus számának növelésével hogyan változik a felület.

50 impulzus mellett szinte tökéletes kör alakban jött létre a felület, a hőhatás övezet nem kivehető az ábrán, viszont a LIPSS a teljes felületen megjelenik, ahol a nyaláb a felületet érte.



28. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 46,5%
impulzusszám: 100

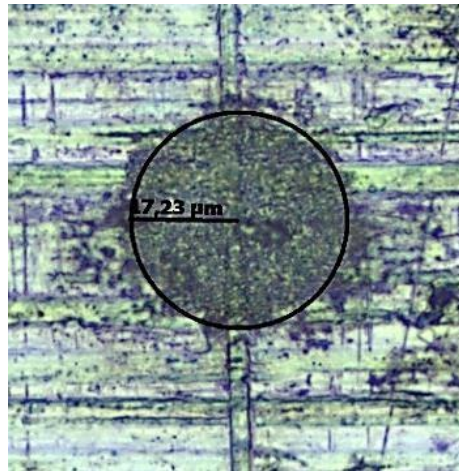
100 impulzus mellett már látható, hogy a folt közepén az anyag a hő hatására már megolvadt, itt eltűnt a LIPSS, a hőhatás övezet már halványan megjelenik a bevitt energia hatására. A folt szélén nincs égés, számottevő szerkezeti elváltozás nem történt.



29. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 46,5%
impulzusszám: 200

200 impulzus hatására már számottevő változás figyelhető meg. Az ábrát Z-stack módban készítettem 10 képből áll össze. Erre azért volt szükség, mivel már jelentős

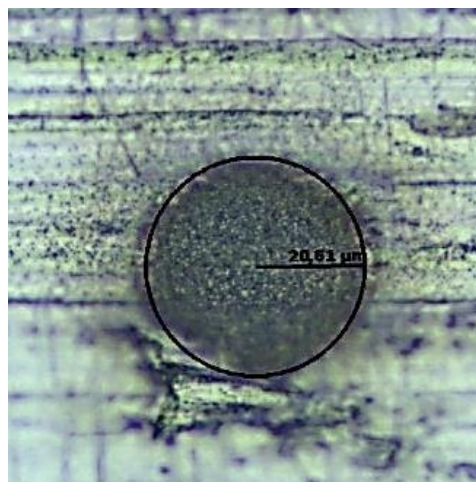
anyagkiválás történt, látszik, hogy a folt közepe a felülethez képest már mély. Itt már LIPSS nincs, a hőhatás övezet egyre nagyobb területen jelentkezik, égés azonban továbbra sincs. A felületen azonban jól kivehető struktúrák jelentek meg még ekkora impulzus esetén is. Tehát elmondható, hogy 46,5% teljesítményen értékelhető LIPSS-eket 50 és 200 impulzus között kapunk.



30. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 47,5%

impulzusszám: 50

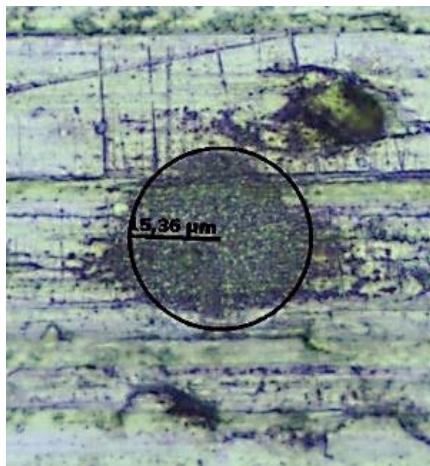
A 30. és 31. ábra 47,5% teljesítménnyel készült. 50 Impulzus hatására szinte teljesen kör alakban jelenik meg az általam keresett nanostruktúra, hőhatás övezetet nem láttam a folt körül. A hatásfolt közepén megjelenő elmosódás felületi hiba nem a nyaláb hatására bekövetkező szerkezet változás.



31. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény:47,5%

impulzusszám: 100

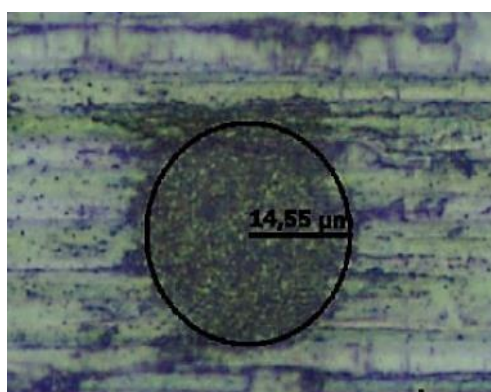
100 impulzus hatására már mélyül a folt, a hőhatás övezet egyre nagyobb a kiterjedése. Megfigyelhető azonban, hogy a hőhatás övezetben is megjelenik a LIPSS, igaz nem olyan erőteljesen, mint magában a foltban. A folt közepén kezd szétesni a struktúra, azonban a folt szélére tolódik.



32. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény:47%

impulzusszám:20

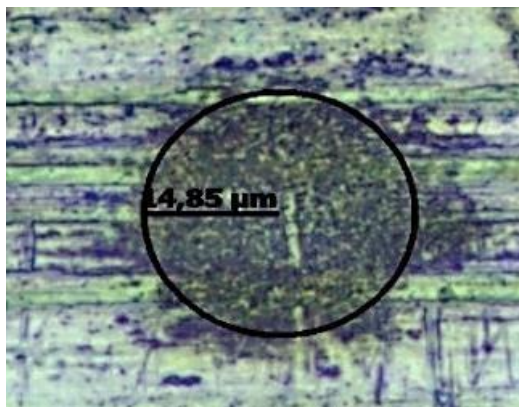
A 32. és 33. ábra 47%-os teljesítménnyel készült. Úgy találtam, hogy ilyen teljesítményszint mellett a kisebb impulzusok adtak megfelelő képet. Ezért a 20 impulzust vizsgáltam, szerkezeti elváltozás és hőhatás övezet nem látható. A LIPSS a felületkezelés helyén megjelent.



33. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 47%

impulzusszám: 25

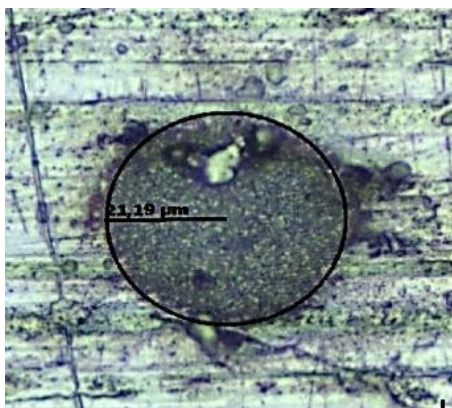
Az előbbihez hasonlóan nincs számottevő változás, a megjelenő LIPSS jól kivehető a mikroszkópos képek alapján.



34. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 48,5%

impulzusszám: 25

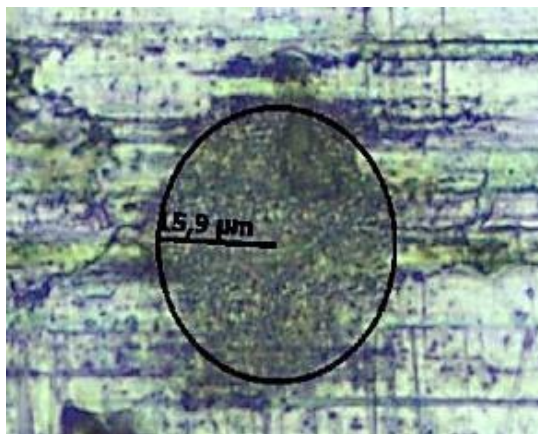
A 34. és 35. ábra 48,5% teljesítménnyel készült. 25 impulzus hatására már megjelent a LIPSS. Sajnos az ábra minősége miatt nem vehető ki olyan jó minőségű felület, mint a korábbi képeknél látható volt. Azonban sem égés sem pedig kiterjedt hőhatás övezet nincs. A megmunkált terület csak a felületre korlátozódik.



35. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 48,5%

impulzusszám: 100

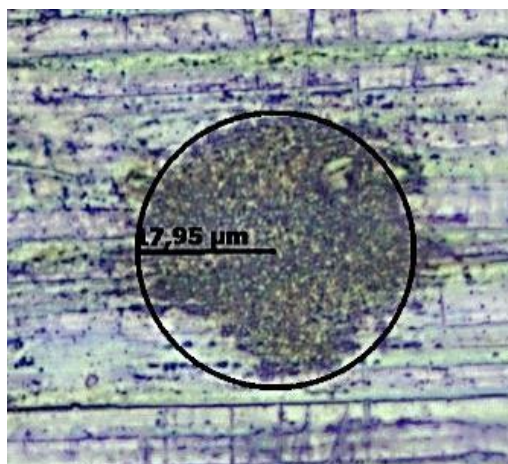
100 impulzus esetében már a folt közepén megfigyelhető a változás. Az anyag kezd megolvadni és kezd kialakulni a hőhatás övezet is. A folt közepén kezd eltűnni a struktúra, azonban a folt szélén továbbra is jól látható.



36. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 48%

impulzusszám: 25

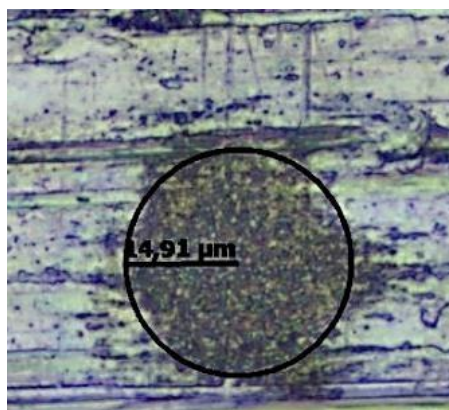
A 36. ábrát 48%-os teljesítményen készítettem. 25 impulzus mellett a teljes felületen megjelent a nanostruktúra. Egyéb nem kívánt változás nem látható.



37. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 50%

impulzusszám: 25

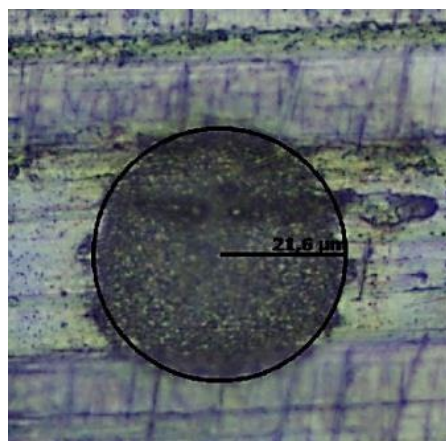
A 37. és 38. ábra teljesítménye 50%. 25 impulzus mellett bár látszik a LIPSS jelleg, azonban ez inkább a folt szélére korlátozódik. A folt közepén nem jelentős a struktúra létrejötte.



38. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény:50%

impulzusszáma: 100

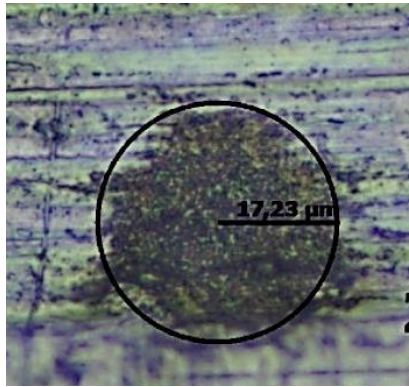
100 impulzus hatására pedig kezd eltűnni a struktúra. Már nem egyértelmű a jelenléte a folt szélén sem. Szinte tökéletes kör alakú a folt, hőhatás övezetét nem észleltem, egyéb jelentős elváltozást sem láttam.



39. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 53,5%

impulzusszáma: 25

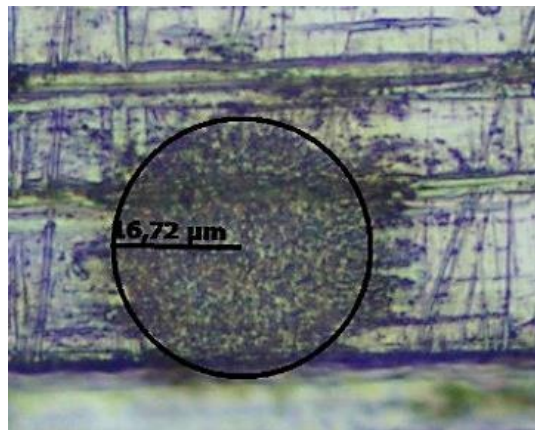
A 39. ábrát 53,5% mellett készítettem. Bár az impulzus száma kicsi, a teljesítmény már olyan jelentős, hogy a folt közepéből az anyag egy rész ablálódott, fröccsenés is megfigyelhető a folt területén. LIPSS csak a folt szélén jelenik meg.



40. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 53%

impulzusszáma: 20

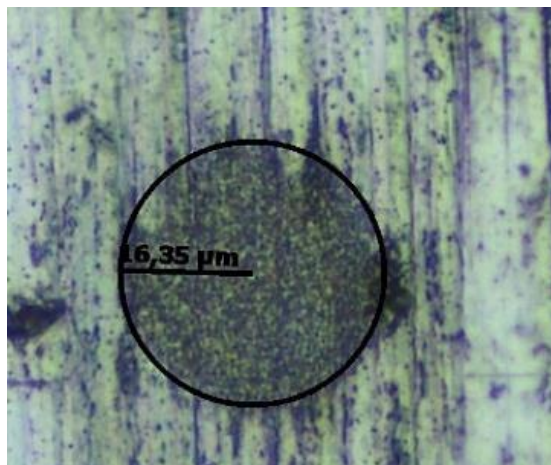
A 40. és 41. ábra teljesítménye 53% volt. 20 impulzus mellett a folt szélén lévő elszíneződés a hőhatás övezetét jelzi, azonban a kiterjedése csak a folt szélére lokalizálódik. Ebben az övezetben kevésbé látható az ábráról, azonban a LIPSS megjelent, ellenben a folt belső területeivel.



41. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 53%

impulzusszáma: 25

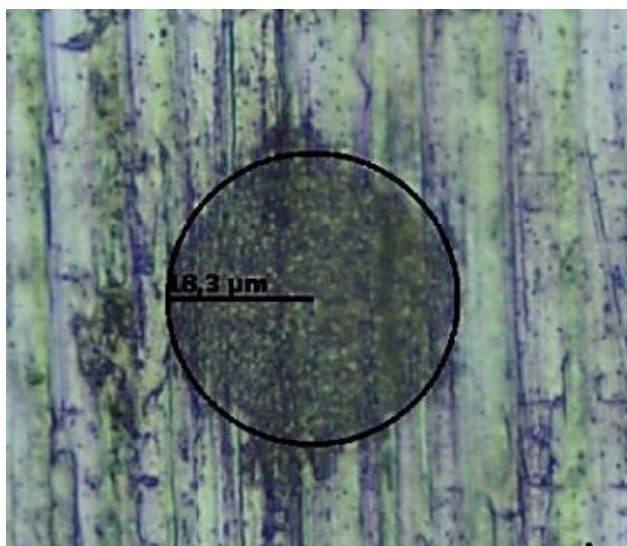
Ilyen teljesítmény mellett látható, hogy már pár impulzus hatására is jelentős javulás következik be a LIPSS láthatóságát tekintve. A két kép közti különbség 5 impulzus, azonban láthatjuk, hogy 25 impulzus hatására, a hőhatás övezetét nem lehet észrevenni az ábrán, a teljes felületen LIPSS képződött. Itt is igaz, hogy bár a teljes felületen létrejött a keresett struktúra, mégis a folt szélén jelenik meg jelentősebb mértékben.



42. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 54%

impulzusszám: 20

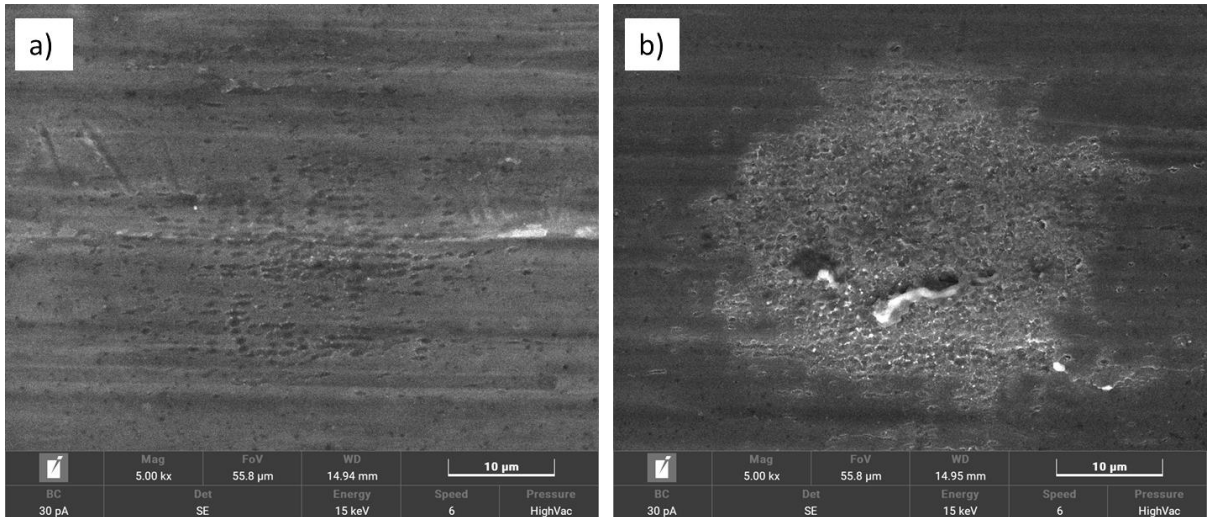
A 42. ábra már 54% teljesítményen készült. 20 impulzus mellett jól kivehető LIPSS jött létre, melyet vízszintesen láthatunk. Ennek csupán az az oka, hogy a mintát a mikroszkóp objektívje alá 90°-kal elfordítva helyeztem be. Azonban tökéletes LIPSS jött létre egyéb felületi elváltozás nélkül.



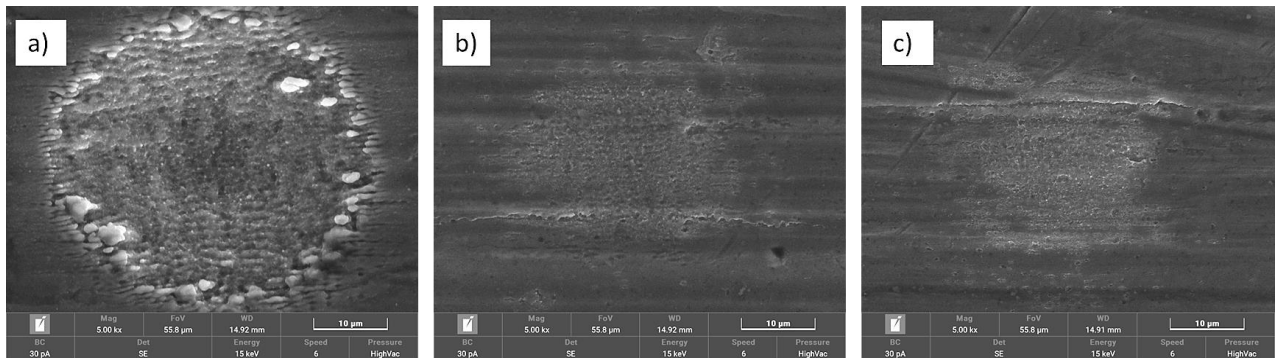
43. ábra: a fs-lézernyaláb behatásainak vizsgálata teljesítmény: 55%

impulzusszám: 20

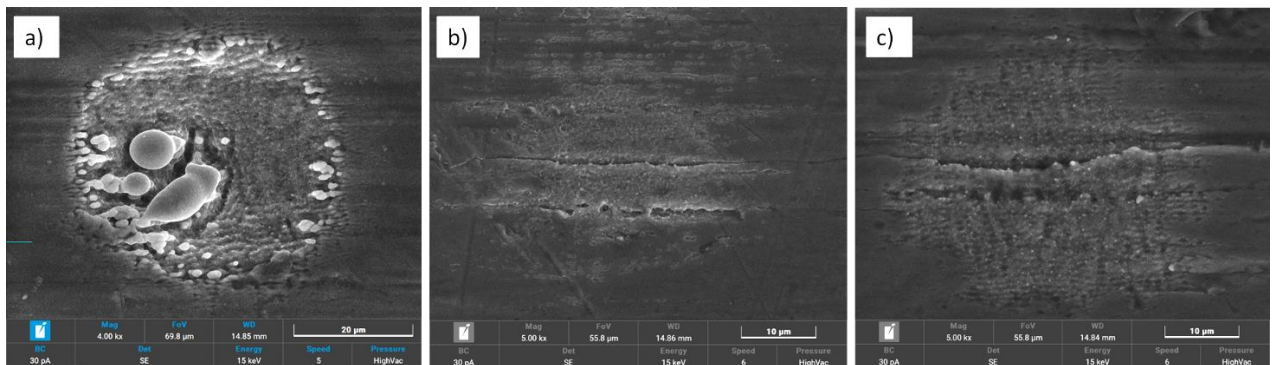
A 43. egyben utolsó ábra pedig 55%-os teljesítményszint mellett készült. Az előbbihez hasonlóan itt is megfelelő LIPSS felület keletkezett. Itt is igaz, hogy a minta 90°-kal volt elforgatva és a struktúra megjelenik a teljes felületen, azonban leginkább a folt szélein figyelhető meg.



44. ábra: SEM felvétel 25 ismétlés szám mellett a) teljesítmény: 15%;
b) teljesítmény: 90%



45. ábra: SEM felvétel 50% teljesítmény mellett: a) $b=500$; b) $b=10$; c) $b=20$



46. ábra: SEM felvétel 55% teljesítmény mellett: a) $b=500$; b) $b=10$; c) $b=50$

Megvizsgáltam a hatásfoltok átmérőjét és az impulzusok számát adott teljesítmény mellett. A foltokátmérőjét és az impulzusok számát alábbi táblázatokban foglalom össze. A foltok átmérőjét az impulzusok számának függvényében ábrázolom, az ehhez tartozó adatokat a 2. -11. táblázatokban foglaltam össze:

2. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 45% és 45,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
12,45	10
15,99	20
15,2	25
16,75	50
11,77	100
15,24	200
13,62	250
16,28	500
Teljesítmény: 45%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
6,16	10
12,58	20
16,02	25
16,69	50
19,45	100
23,39	200
22,98	250
13,76	500
Teljesítmény: 45,5%	

3. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 46% és 46,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
6,47	10
10,96	20
14,9	25
16,21	50
20,41	100
22,07	200
22,85	250
23,49	500
Teljesítmény: 46%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
12,35	10
11,04	20
13,75	25
15,94	50
20,27	100
22,41	200
23,58	250
23,98	500
Teljesítmény: 46,5%	

4. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 47% és 47,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
10,41	10
15,36	20
14,55	25
17,2	50
21,1	100
23,76	200
24,39	250
24,87	500
Teljesítmény: 47%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
10,42	10
12,28	20
15,64	25
17,23	50
20,61	100
22,89	200
24,56	250
25,7	500
Teljesítmény: 47,5%	

5. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 48% és 48,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
8,82	10
15,22	20
15,9	25
17,79	50
22,22	100
23,09	200
23,31	250
24,76	500
Teljesítmény: 48%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
10,79	10
14,2	20
14,85	25
19,67	50
21,19	100
24,71	200
25,09	250
26,21	500
Teljesítmény: 48,5%	

6. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 49% és 49,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
13,18	10
16,75	20
15,37	25
19,08	50
20,76	100
23,39	200
24,71	250
26,94	500
Teljesítmény: 49%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
nem értékelhető	10
15,11	20
16,34	25
19,44	50
20,94	100
24,13	200
25,54	250
26,43	500
Teljesítmény: 49,5%	

7. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 50% és 50,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
11,00	10
14,37	20
14,91	25
17,66	50
21,6	100
24,96	200
23,81	250
25,79	500
Teljesítmény: 50%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
9,89	10
15,6	20
14,9	25
18,7	50
20,3	100
23,59	200
24,09	250
25,69	500
Teljesítmény: 50,5%	

8. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 51% és 51,5% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
10,54	10
14,43	20
17,21	25
19,07	50
24,46	100
24,96	200
23,95	250
26,95	500
Teljesítmény: 51%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
11,48	10
13,88	20
16,78	25
19,04	50
22,38	100
25,19	200
25,5	250
27,62	500
Teljesítmény: 51,5%	

9. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 52% és 53% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
12,76	10
16,48	20
15,83	25
20,18	50
21,54	100
25,22	200
24,65	250
27,17	500
Teljesítmény: 52%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
13,16	10
15,45	20
16,62	25
19,73	50
20,23	100
24,77	200
24,42	250
27,2	500
Teljesítmény: 53%	

10. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 53,5% és 54% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
13,75	10
17,23	20
17,95	25
21,56	50
21,91	100
25,28	200
25,21	250
27,84	500
Teljesítmény: 53,5%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
13,29	10
16,72	20
18,45	25
19,65	50
22,55	100
25,01	200
27,68	250
28,56	500
Teljesítmény: 54%	

11. táblázat: hatásfoltok és az impulzusok száma 54,5% és 55% teljesítmény mellett

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
14,54	10
18,32	20
20,36	25
nem értékelhető	50
23,34	100
25,08	200
27,35	250
29,3	500
Teljesítmény: 54,5%	

folt átmérő [μm]	impulzus szám [db]
11,58	10
16,35	20
18,3	25
22,01	50
22,86	100
25,61	200
25,8	250
26,03S	500
Teljesítmény: 55%	

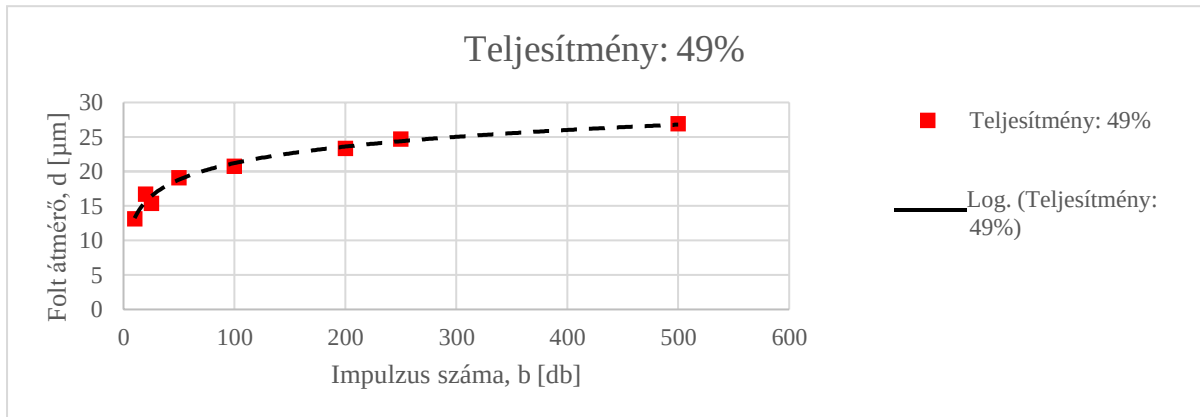
Bár vizsgáltam az 1 és 2 impulzus szám esetén bekövetkező felületváltozást, azonban semmilyen felületi változás nem jött létre ebben az esetben.

Ugyanígy az is látható, hogy a 3 és 5 impulzusok sem minden esetben hoznak létre LIPSS felületeket.

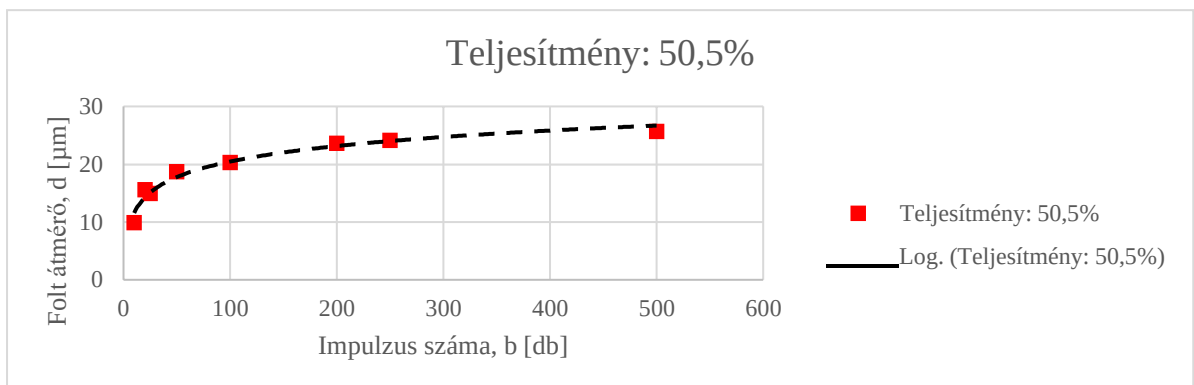
Ami minden ettől eltérő esetben LIPSS felületet hozott létre az 10 impulzustól 500 impulzusig tartó tartományban keletkezett.

A diagramok pontatlansága a mérési, illetve a kör alaktól eltérő LIPSS felületek alakjából származik. Így a diagramok alapján következtetést tudunk levonni, ez alapján a paraméterek változtatásával következtethetünk a várható értékekre.

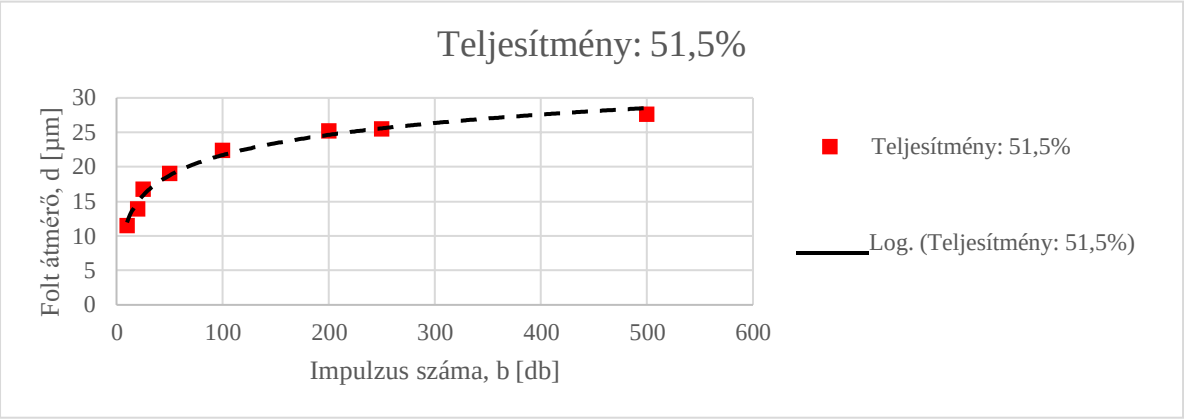
Az alábbiakban az egyes teljesítményekhez tartozó folt átmérőket ábrázoltam diagramon az impulzusok számának függvényében.



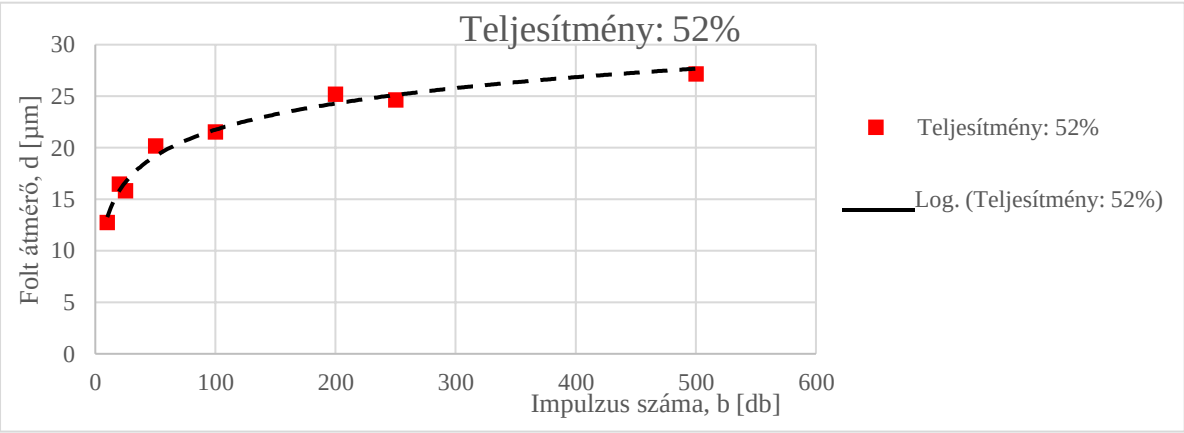
47. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 49% teljesítményen



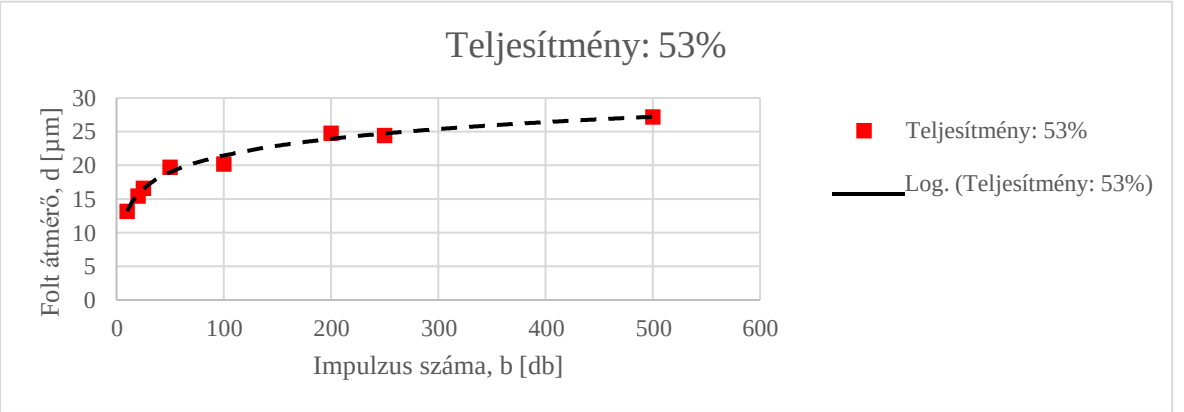
48. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 50,5% teljesítményen



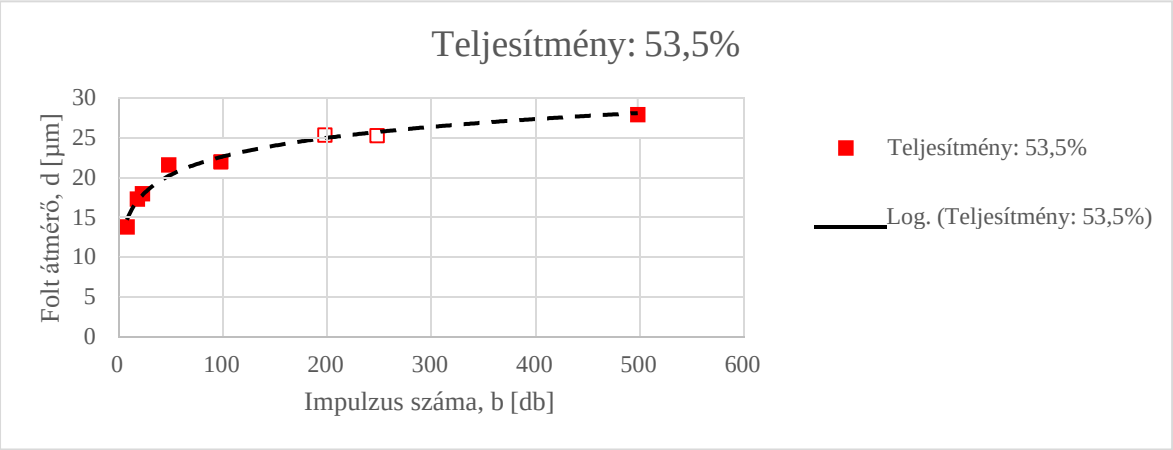
49. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 51,5% teljesítményen



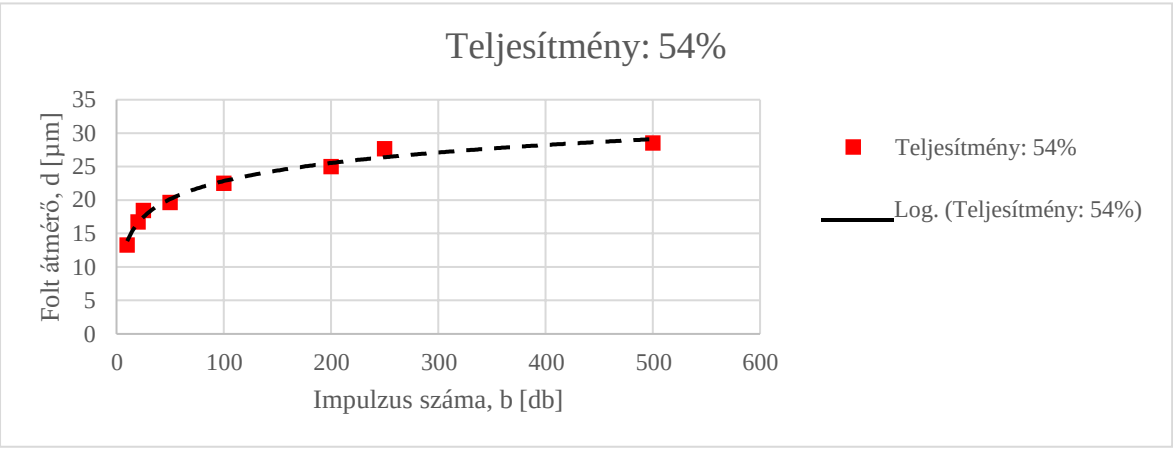
50. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 52% teljesítményen



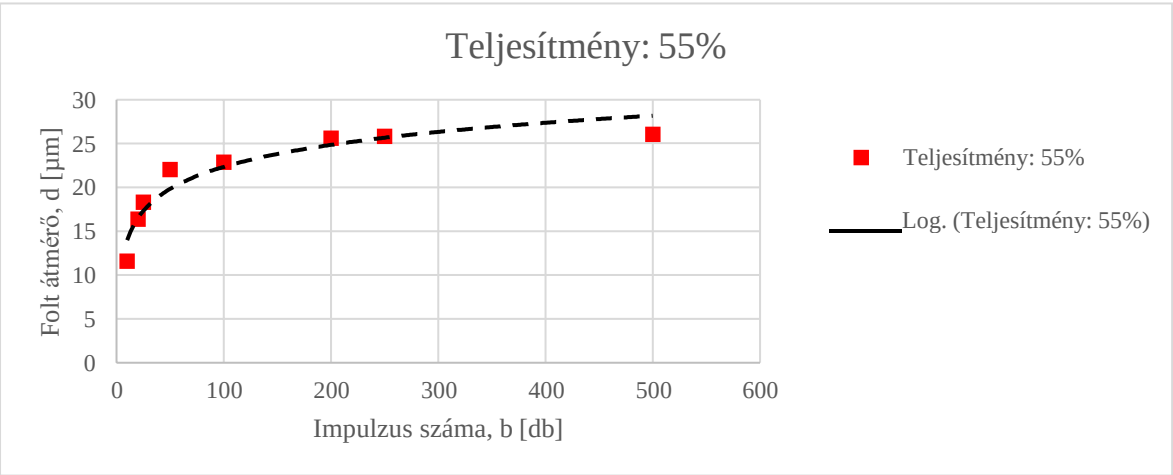
51. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 53% teljesítményen



52. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 53,5% teljesítményen



53. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 54% teljesítményen



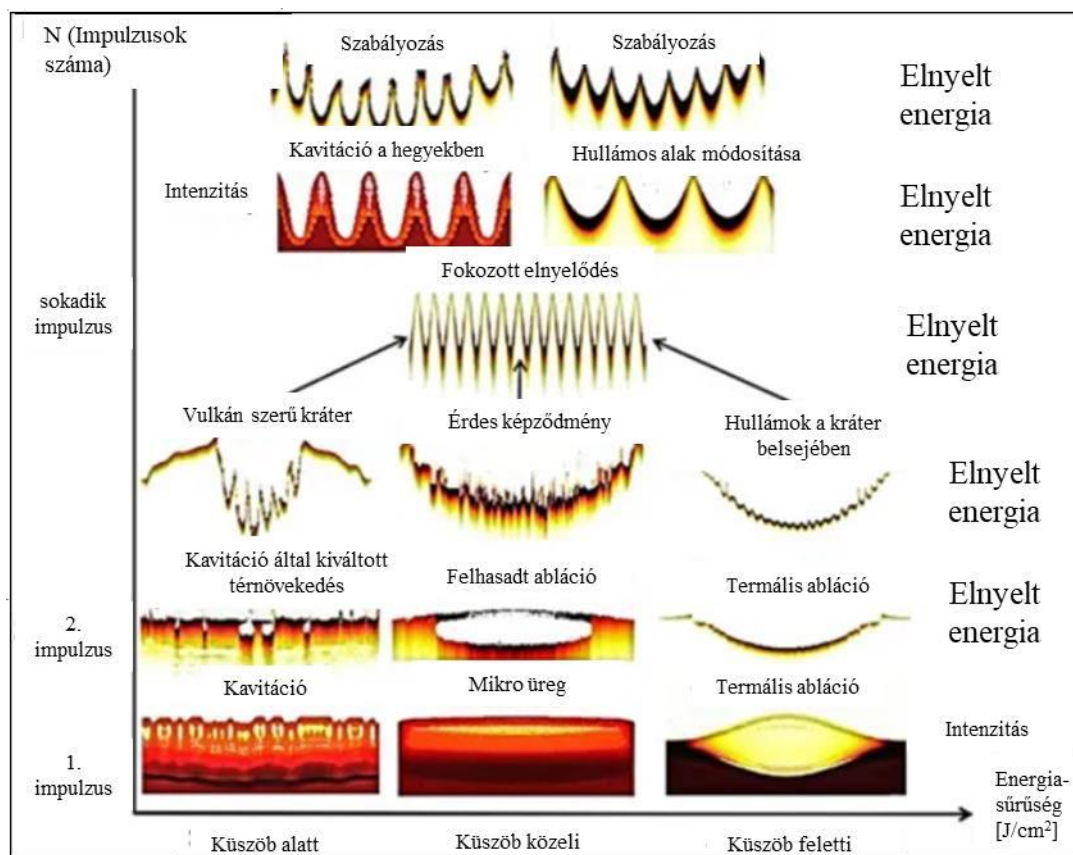
54. ábra: hatásfolt átmérő az impulzus szám függvényében 55% teljesítményen

A fenti (44-52 ábrák) diagramok alapján belátható, hogy a hatásfoltok mérete és az impulzusok száma közt logaritmikus összefüggés van. Ez összhangban van azzal, ha az adott energiát több impulzussal vesszük be, akkor egyre nagyobb lesz a folt átmérője is.

Az adatokat a piros négyzet jelöli, köztük nincs kapcsolat. Viszont az adatok alakulását egy trendvonal felvételével meg tudtam közelíteni, ezt demonstrálja a fekete szaggatott vonal. A folt átmérő adatainak várható alakulását legjobban egy logaritmus függvénnyel lehet közelíteni, a trendvonal nem folytonos vonal, mivel az valós fizikai tartalmat nem hordoz csupán szemléltetés.

Az adatok csak közelítő értékek a mérési pontatlanságok miatt, azonban a mennyiségek közötti összefüggéseket így is le lehet olvasni a trendvonalnak köszönhetően.

Az alábbi ábra (52. ábra) segítenek a LIPSS keletkezés és általában lézeres anyagmegmunkálás során bekövetkező mikro- és nano szinten végbemenő folyamatok megértésében. Továbbá megkönnyíti mind a nano mind a femtoszekundumos lézerek és anyag közti kölcsönhatás hasonlóságainak és különbségeinek a tanulmányozását.



55. ábra: A lézeres megmunkálás során bekövetkező folyamatok [6]

6. EREDMÉNYEIM ÖSSZEHASONLÍTÁSA NEMZETKÖZI FOLYÓÍRATOK EREDMÉNYEIVEL

Általánosságban kijelenthető, hogy a LIPSS-ek kutatásának szempontjából az acélok bírnak nagy jelentőséggel.

A szakirodalmakat tekintve inkább különböző összetételű acélok felületén próbálnak LIPSS-eket létrehozni.

Erre egy kiváló példa egy 2020-ban megjelentetett tanulmány.

Yinming Shao és munkatársai a ZrSiSe-t vizsgálták. Ez egy 3 atomvastagságú kristály. A felülete vezetőként, a belső rétege pedig szigetelőként viselkedik. Így amikor a nyaláb az anyag felületére érkezett, a felület átengedte azt, majd az anyag belsejében bekövetkezik a hiperbolikus terjedés, ami azt jelenti, hogy a nyaláb az anyag belsejében cikk-cakk alakban terjed. Hullám alakokat figyeltek meg különböző vastagságú mintákban [9].

A legtöbb eredményt az acélokkal érték el, így a dolgozatban a LIPSS keletkezését ezek alapján magyaráztam.

Műanyagokban is sikerült már a struktúra létrehozása, ami szintén érdekes kutatási lehetőség.

Esetemben a legnagyobb jelentőséggel az alábbi cikk bír:

Rajamudili Kuladeep és munkatársai TI:zafír lézerrel 110 fs impulzussal és 800 nm- es hullámhosszon tanulmányozták a LIPSS keletkezését alumínium felületeken.

A megfigyelt LIPSS alacsony térbeli frekvenciájú LIPSS, amelyek merőlegesen orientálódnak a lézerpolarizációra 460 és 620 nm közötti periodicitással. Al nanorészecskéket tartalmazó kolloid oldatokat elektronmikroszkóppal vizsgálva a nanorészecskében belső üregek képződnek. Az oldatokat etanolban és vízben is létrehozták, mindkét esetben megfigyelhetők az üregek [10].

Azonban az alumínium vizsgálatát tekintve nem találtam sok tanulmányt. Így az alumíniumok felületén a LIPSS létrehozása még további kutatási terület lesz.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom fő célja a LIPSS megismerése volt. A dolgozatomban ismertettem a struktúra magyarázatának legelfogadottabb elméleteit. A keletkezését először az acélokon keresztül tanulmányoztam, majd az alumínium esetében megpróbáltam létrehozni a felületet. Több beállítás mellett vizsgáltam a kialakult felületi struktúrát, míg megtaláltam azt a paraméter beállítást, amely közelében már érdemes volt a vizsgálatokat pontosítani. Ezzel még tovább szűkítettem a paramétereket, így végül megállapítottam, hogy 10 MHz frekvencián alumínium felületen 45-55%-os teljesítmény mellett alakult ki a legszabályosabb.

Mind a fénymikroszkóppal készített kép (42. ábra), mind a diagram (50. ábra) alapján kijelenthető, hogy a vizsgált teljesítmények mellett az 54%-os teljesítmény mellett kaptam a legszabályosabb LIPSS-et, melynek létrehozását tartom dolgozatom legfőbb eredményének.

A későbbiekben tovább elemzem a LIPSS keletkezése közben fellépő kölcsönhatásokat és ezen hatások befolyását a kialakuló struktúrára. Továbbá elektronmikroszkópos felvételek alapján is elemzem az alumíniumon kialakuló LIPSS-et. További kutatási téma lehet, ha oxigén közeg helyett inert gáz közegben végzem el a kísérletet.

Összességében a kísérletem célja az volt, hogy a ragasztó kötéshez a nedvesítést javítsam. Ehhez egy innovatív eljárás a LIPSS létrehozása, amely javítja a nedvesítést.

A célkitűzést elértem, a felület létrehozáshoz szükséges optimális energiát 0,5% pontossággal sikerült meghatároznom. Valamint az impulzus számot is sikerült 20 és 50 impulzus közé korlátoznom, ez azonban energiafüggő.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőmnek Dr. Berczeli Miklós adjunktusnak, hogy felajánlotta a lehetőséget, így részt vehettem a kutatásban. Továbbá köszönöm a rengeteg segítséget és biztatást, melyet mind szakmailag mind pedig emberileg nyújtott. Általa láthattam milyen is egy kutatás valójában, türelemre és kitartásra tanított, amely tulajdonságoknak a továbbiakban is hasznát fogom venni.

Köszönettel tartozom konzulensemnek Könyves Zsolt tanszéki mérnöknek, aki mindig rendelkezésemre állt és segítette a dolgozat elkészültét a mintáim elkészítésétől a mikroszkópos képek elkészítéséig. Valamint meglátásaival folyamatosan segített a dolgozat elkészítését.

Köszönöm a szakmai segítséget Juhász Gergely tanszéki mérnöknek, akihez szakmai kérdéseimmel fordulhattam, Windisch Márknak, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Kutatójának pedig a SEM képek elkészítését.

Köszönöm a Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék minden munkatársának, aki bármilyen módon segítette a munkámat.

Nem utolsó sorban külön köszönettel tartozom családomnak, akik mind a kutatás, mind a dolgozat megírása alatt végig türelmesek voltak, bátorítottak és biztattak a folytatásra. Minden segítséget megadtak, hogy a dolgozatomra koncentrálhassak, nélkülük nem jött volna létre a dolgozatom.

9. IRODALOMJEGYZÉK:

- 1.: Szombatfalvy Anna: Járműipari öntészeti Al-Si ötvözetek tulajdonságainak vizsgálata, PhD-értekezés, 2012
- 2.: Gauss- nyaláb Wikipédia [Megtekintve: 2021. 11. 07.]
- 3.: Neumann János Egyetem_3.-Szakmai -tanulmány: 8. Neumann János Egyetemen összeállított ragasztási kísérletek alapanyagai, eszközei és mérési módszerei, 2021
- 4.: NeumannJánosEgyetem_2.-Szakmai-tanulmány: 7. Lézersugaras technológiák általános Jellemzése, 2021
- 5.: Juhász Gergely: Impulzus üzemű lézersugárzás hatására megjelenő LIPSS vizsgálata ausztenites acélon, szakdolgozat, 2021
- 6.: Nanotechnology and Precision Engineering 3 (2020) 105-125
Xinxin Li, Yingchun Guan :Theoretical fundamentals of short pulse laser–metal interaction: A review
- 7.: S. Maragkaki, M. Kasishke, J. Hoppius, E. Gurevich: Physical Mechanisms and Applications of the Laser- Induced Periodic Surface Structures, EUROMAT 2019.
- 8.: Berczeli Miklós: Járműipari kötések fejlesztése felületkezelési eljárásokkal Doktori értekezés, 2022
- 9.: <https://phys.org/> Ellen Neff: Physicists see light waves moving through a metal, 2022 [Megtekintve: 2021. 11. 05.]
- 10.: Journal of Applied Physics **116**, 113107 Journal of Applied Physics 116, 113107 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4896190>
Rajamudili Kuladeep1, Mudasir H. Dar1, K. L. N. Deepak2, and D. Narayana Rao
- 11.: LASRAM: Monaco Femtosecond Laser
- 12.: <http://www.techmonitor.hu>: Nagy szilárdságú alumíniumötvözetek a gépjárműipar számára [Megtekintve: 2021. 11. 07.]
- 13.: <https://www.powerbelt.hu> [Megtekintve: 2021. 11. 07.]
- 14.: <https://www.villanylap.hu>: Az alumínium elektrolit kondenzátorok belső világa [Megtekintve: 2021. 11. 07.]
- 15.: <https://alucobond-homlokzat.hu/> [Megtekintve: 2021. 11. 07.]
- 16.: <https://www.trumpf.cn> [Megtekintve: 2021. 11. 07.]