

Miskolci Egyetem,
Anyag- és Vegyészmérnöki Kar
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI TANÁCS

**ULTRARÖVID IMPULZUSÚ LÉZERSUGÁR ALKALMAZÁSA MINTÁZAT
KIALAKÍTÁSÁRA SZERSZÁMACÉLOK FELÜLETÉN**

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

KÉSZÍTETTE: KÖNYVES ZSOLT,

KOHÓMÉRNÖK MSC HALLGATÓ

KONZULENSEK: Prof. Dr. Mertinger Valéria, Sepsi Máté, Dr. Koncz-Horváth Dániel

Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet



Miskolc 2024.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Irodalmi áttekintés	4
2.1. A lézerek fejlődése.....	4
2.2. Az ultrarövid impulzusú lézer-anyag kölcsönhatás során lejátszódó jelenségek.....	5
2.3. Súrlódás.....	6
2.4. Mikromegmunkálás, felületi mintázat és alkalmazásai	7
3. Kutatómunka során alkalmazott anyag és módszerek.....	10
3.1. Vizsgálandó anyag kiválasztása	10
3.2. Az alkalmazott lézertechnológia	10
3.3. Pásztázó elektronmikroszkópia	12
4. A kísérleti mátrix és az eredmények bemutatása	14
4.1. A lézeres kezelés paraméterei.....	14
5. Konklúzió, eredmények összefoglalása	33
6. Köszönetnyilvánítás	35
7. Irodalomjegyzék	36

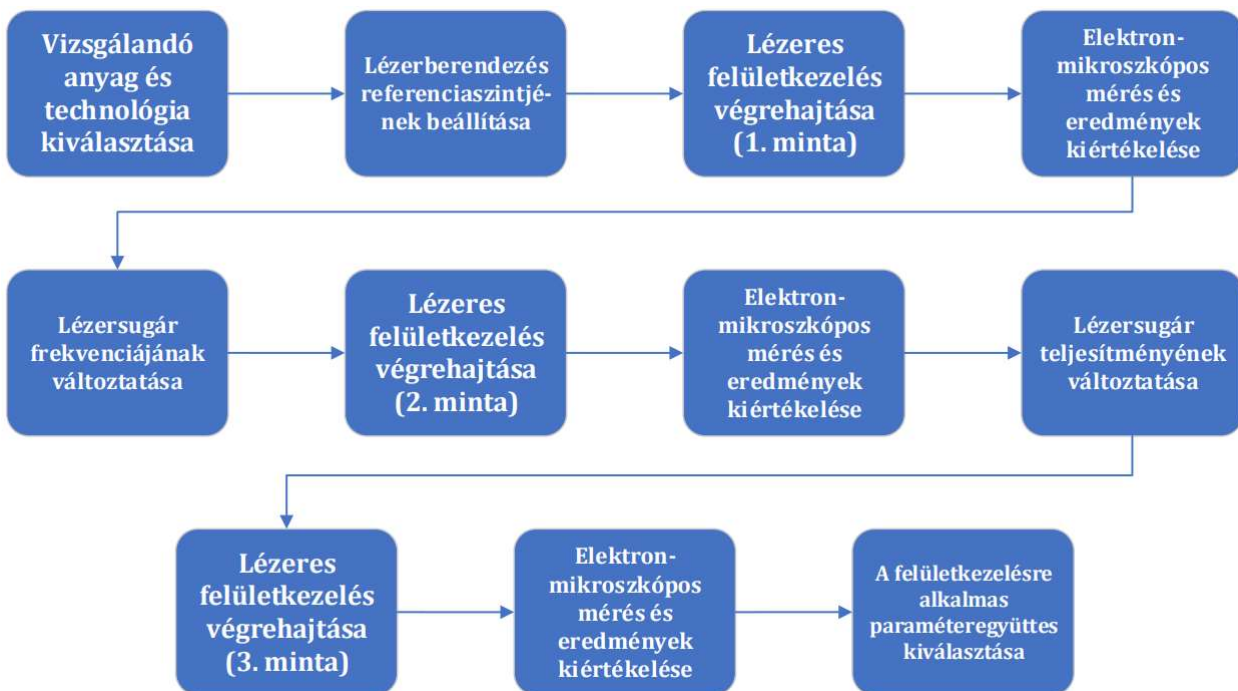
1. Bevezetés

Az egyre nagyobb gyártási kapacitást igénylő modern és innovatív technológiák megkövetelik, hogy az anyagmegmunkáló szerszámok élettartamai hosszabbak, teljesítményeik nagyobbak és nem utolsósorban előállítási- és karbantartási költségeik alacsonyabbak legyenek.

A technológiai tervezők, anyagmérnökök szüntelenül keresik a fejlesztési lehetőségeket. A keménység és porkohászati technológiák rendkívül gazdaságos eljárások, kombinálva hőkezelési és bevonatolási módszerekkel nagy keménységet és kopásállóságot biztosítanak. A további teljesítménynövekedés érdekében a nagyenergiásűrűségű technológiák közkedvelt megoldások a szerszámok további felületkezelésében és aktív kutatási területnek számítanak mind az ipari, mind az anyagtechnológiai szegmensben egyaránt.

MSc tanulmányaim során bekapcsolódtam a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetben zajló OTKA pályázat keretein belüli technológiai fejlesztésbe, ahol azt a feladatot kaptam, hogy szerszámacél felületén a súrlódási viszonyokat módosító szabályos mintázatot hozzak létre. Kutatómunkám során az ultrarövid impulzusú lézertechnológia felhasználási lehetőségeit vizsgálom, célom, hogy megismerjem az ultrarövid impulzusú lézersugár és az anyag kölcsönhatását és annak következményeit, a felületi mintázat kialakításának lehetőségeit, valamint anyagszerkezeti változásait a legmodernebb mérési eljárások felhasználásával.

Dolgozatomat az 1. ábra által vázolt folyamat szerint készítettem el:

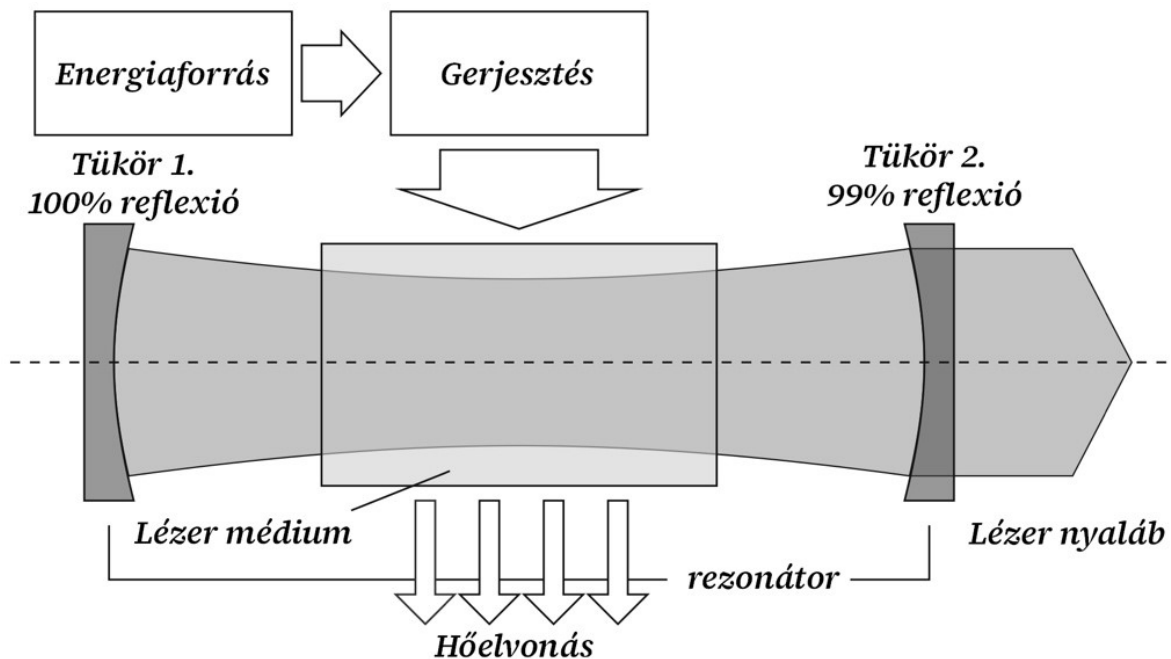


1. ábra: A dolgozat folyamatábrája

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A lézerek fejlődése

Kezdetben a "lézer" kifejezés a "Fényerősítés a sugárzás stimulált emissziója által" rövidítése volt, amely egy speciális fényerősítési eljárást jelentett. A kifejezést később egyre inkább az ezt a folyamatot alkalmazó technikai eszköznek a megnevezésére használták. Így a "lézer" szó gyakran egy speciális sugárforrást jelent, amit a 2. ábra mutat be sematikusán. A lézersugárnak olyan különleges tulajdonságai vannak, amelyek különféle műszaki és tudományos alkalmazásokban érdekesek lehetnek. Ezek a tulajdonságok lényegében abból fakadnak, hogy miként jön létre vagy erősödik fel a lézersugár a stimulált emisszió fizikai folyamata során. Azonban ehhez egy speciális lézerforrás, rezonátor kialakítása szükséges annak érdekében, hogy ki lehessen használni a stimulált emissziót, és valóban lézersugárt lehessen előállítani. A rezonátor egy optikai rendszer, amely tartalmaz legalább két visszaverő tükört (nyitó- és zárótükör) és egy gerjesztett médiumot, amely lehet félvezető, szilárd vagy gázközegű. A zárótükör 100%-os reflexióval rendelkezik, míg a nyitó tükör részben áteresztő (~99%), így az erősített sugárzás egy része koherens lézernyalábként csatolható ki. Az elmúlt évek során számos különböző lézertípust fejlesztettek ki. Ezek a lézerek jelentős geometriai méret- és teljesítménykülönbségeket mutatnak, valamint eltérő kibocsátási frekvenciával rendelkeznek [1].



2. ábra: Sematikus ábra a lézer sugárforrás felépítéséről [1]

A technológia folyamatos fejlődésével párhuzamosan növekszik az igény a magasabb sugárminőségű és hatékonyabb lézerek iránt. Az újabb fejlesztési irányok között kiemelkedő szerepet kapnak a rövidebb impulzusú lézerek, amelyek csökkentik az anyag hőterhelését, miközben a rövidebb hullámhosszok nagyobb mértékben nyelődnek el az anyagban. Ennek eredményeképpen kisebb hőterheléssel, valamint kisebb geometriákkal rendelkező struktúrák előállítása válik lehetővé. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően idővel ezeket a folyamatokat egyre gazdaságosabban lehet megvalósítani, hozzájárulva ezzel a hatékonyabb és pontosabb anyagmegmunkáláshoz [2].

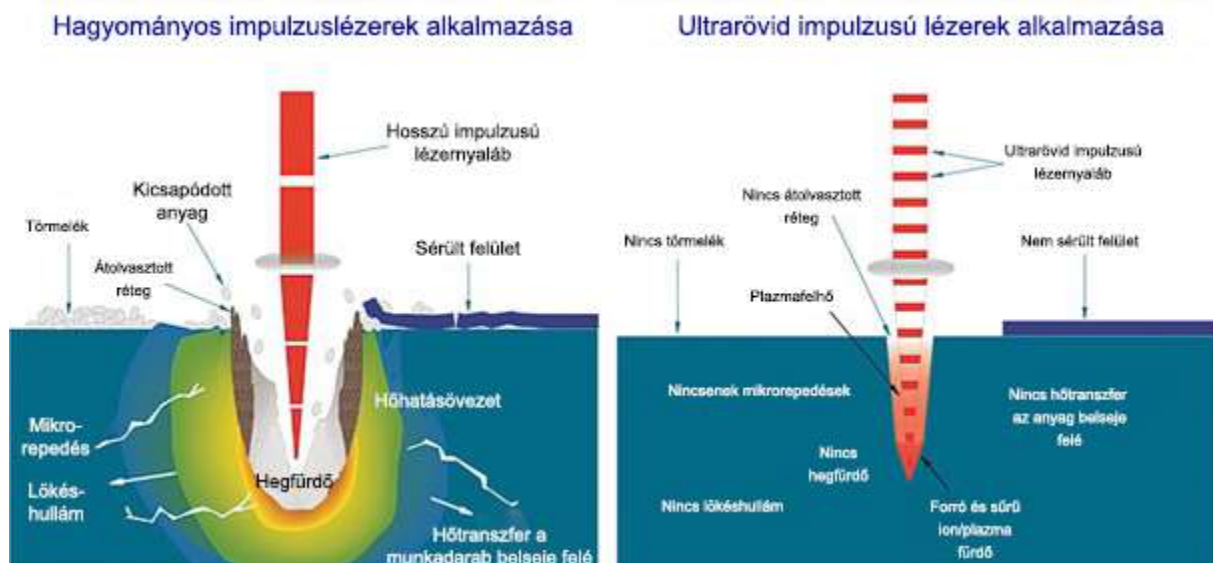
Az 1. táblázat különböző lézereket hasonlít össze az impulzusidő, a teljesítmény és a költségek vonatkozásában.

1. táblázat: Különböző impulzusidejű lézerek teljesítménye és költsége [2]

Lézer típusa	Kvázi folyamatos Nd:YAG	Q-kapcsolt Nd:YAG	„Chirped Pulse Amplification” Ti:Sapphire
Impulzus szélesség:	1 ms	100 ns	100 fs
Intenzitás [W/cm^2]:	10^6	10^8	10^{15}
Átlagos teljesítmény [W]:	100-1000	100-1000	1-10
Berendezés minősége:	Elégséges	Közepes	Kiváló
Áteresztési sebesség:	Nagy	Nagy	Kicsi
Beszerezési ár:	Alacsony	Közepes	Magas

2.2. Az ultrarövid impulzusú lézer-anyag kölcsönhatás során lejátszódó jelenségek

Egy impulzust ultrarövidnek tekintünk akkor, amikor a hődiffúziós mélység az impulzus során azonos nagyságrendű vagy kisebb, mint az optikai abszorpció mélység, amely függ az anyagtól és lézer hullámhosszától [2].



3. ábra: Nano- és femtoszekundumos anyagmegmunkálás összehasonlítása [3]

Az ultrarövid impulzusok alatt több jelenség is zajlik egyidőben:

A **multifoton abszorpció** egy olyan jelenség, amely akkor következik be, amikor a femtoszekundumos lézerimpulzusok rendkívül nagy intenzitásának hatására az elektronok egyszerre több foton energiáját abszorbálják. Ennek következtében az elektronok rendkívül gyorsan kerülnek gerjesztett állapotba, ami az anyag szerkezetének változását eredményezi. Ez az egyedülálló jelenség a femtoszekundumos lézeres anyagmegmunkálás alapját képezi, mely lehetővé teszi a mikroszkopikus szintű precíz és kontrollált anyagmódosítást [4].

A **hőhatásmentes abláció** lejárásakor a femtoszekundumos lézerimpulzusok rövid időtartama miatt az energiaelnyelés rendkívül gyors, ami minimális hőenergiát juttat a környező anyagba. Ennek következtében a hőhatásmentes ablációs technika során az anyagokat közvetlenül párologtatással vagy fotokémiai reakcióval távolítják el, hatékonyan megakadályozva a salak, hőhatásövezetek és újrakristályosodási területek káros hatásait a megmunkálási területen [5].

Anyagmódosítás: A femtoszekundumos lézersugár energiája olyan strukturális változásokat indukál, amelyek jelentősen megváltoztatják az anyag tulajdonságait. Az anyagmódosítás magában foglalja a kristályos állapotból az amorf állapotba történő átmenetet, hibák kialakulását, felületi struktúrák kialakítását, valamint az anyagok optikai, elektromos vagy mechanikai tulajdonságainak változását [6].

Helyi hőhatás: A hagyományos technológiák során, ahol a megmunkáló szerszám érintkezik a munkadarabbal nagy hőhatást eredményez és alacsony gyártási hatékonysággal bír. A femtoszekundumos anyagmegmunkálás során a hőhatás minimális, ami alacsony hőstresszt és kiváló minőségű felületkezelést eredményez [7].

Bizonyos körülmények között a femtoszekundumos felületkezelés **önszerveződést** indukál, amelyben az anyag tulajdonságai irányítják a mikro-/nanoszintű periodikus szerkezetek előállítását, potenciálisan egyedi felületi mintázatok vagy struktúrák kialakulásához vezetve [8].

2.3. Súrlódás

A felületek közötti súrlódás, kopás és kenőanyagok viselkedésével, valamint az ezekre vonatkozó technikákkal és megoldásokkal a tribológia tudományterülete foglalkozik. A tribológia területét először a brit Oktatási és Tudományos Minisztérium jelentésében határozták meg 1966-ban, mint a „relatív mozgásban lévő felületek tudománya és technológiája és az ezekkel kapcsolatos tevékenységek” [9].

A súrlódás olyan fizikai jelenség, amely az érintkező szilárd testek közötti ellenállást jelenti a mozgás során. Két fő típusa van: száraz és folyadék-súrlódás. A száraz súrlódás esetében a szilárd testek közötti érintkezési erő a meghatározó, míg a folyadék súrlódásnál a folyadékok belsejében, azok rétegei között fellépő erők játsszák a fő szerepet. Bár a súrlódás elengedhetetlen az energiaátvitel és a mozgás szempontjából, bizonyos esetekben nem kívánatos, például csapágyak esetén, ahol energiaveszteséget és kopást okozhat. A súrlódás jellemzői nagyban függenek a felületi tulajdonságoktól és az érintkező anyagoktól, így a megfelelő kenési módszer kritikus fontosságú a súrlódás minimalizálásában és a rendszer hatékonyságának maximalizálásában.

A testek közötti súrlódás jelenségei mélyen gyökereznek az Amontons-féle alapelvekben, melyek széleskörű alkalmazhatóságot mutatnak különböző területeken. Guillaume Amontons francia fizikus nevéhez kötődik az 1699-ben újra felfedezett súrlódási szabályok meghatározása, amit Leonardo da Vinci már közel 200 évvel korábban előrevetített. Az Amontons-egyenletek az alábbi alapelveken nyugszanak [10]:

Az első szabály szerint a súrlódási erő közvetlenül arányos a terheléssel, melyet a súrlódási együttható (μ) jelöl. Ez az összefüggés jól kifejezhető a súrlódási szög (θ) fogalmával, mely megadja azt a szöget, amely alatt egy test, ha a síkra helyezik, álló helyzetben marad, de ha a dőlésszög nő, elkezd csúszni.

A második szabály szerint a súrlódási erő független az érintkező testek látszólagos érintkezési felületétől. Ez azt jelenti, hogy két test, bár fizikai méretük eltérő lehet, azonos súrlódási együtthatóval rendelkeznek.

A harmadik szabály, melyet gyakran Coulombnak tulajdonítanak, azt állítja, hogy a dinamikus súrlódási erő független a csúszási sebességtől a mozgás megkezdése után.

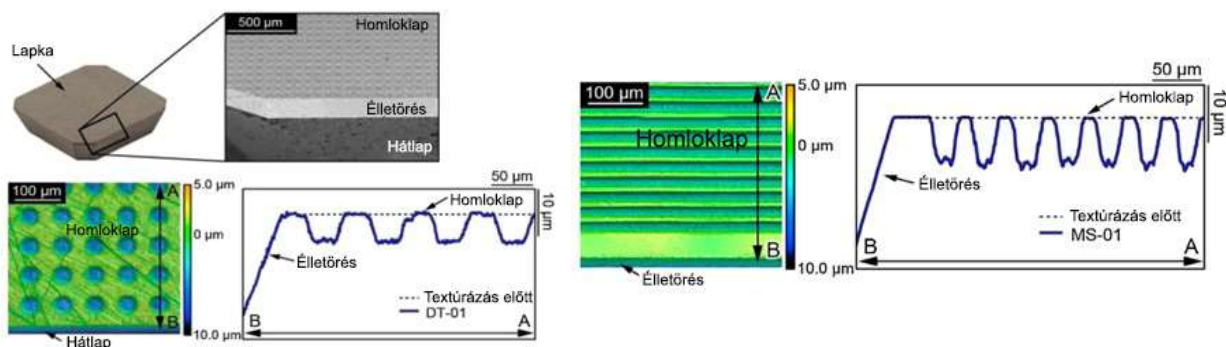
Ezen szabályokra alapozva, a súrlódási együttható általában változatlan marad, kivéve olyan körülmények között, ahol különböző tényezők, például felszíni filmrétegek jelenléte vagy a terhelés nagysága befolyásolja azt. Emellett fontos megjegyezni, hogy a súrlódási együttható szorosan kapcsolódik az adott anyag fizikai jellemzőihez és a környezeti feltételekhez [10].

2.4. Mikromegmunkálás, felületi mintázat és alkalmazásai

Az utóbbi években a mikro-/nanoszerkezetek fontos szerepet játszanak az optika, elektronika, biomedicinai, anyagtudományi és más területeken. Az optikai területen például a mikro-/nanoszerkezetek előállítása segít optikai hullámvezető eszközök, optikai szűrők és polarizátorok létrehozásában, amelyek fontosak az optikai kommunikációban és más optikai

technológiákban. Ezenkívül ezek a szerkezetek szerepet játszanak az optikai érzékelés terén, például optikai érzékelők és spektrumanalizátorok készítésében, amelyek kulcsfontosságúak az környezeti vizsgálatokban és az élelmiszerbiztonságban. Az elektronikában a mikro-/nanoszerkezetek lehetővé teszik kisebb és gyorsabb elektronikai eszközök létrehozását, például mikroprocesszorokat és memóriákat, amelyek javíthatják a készülékek teljesítményét és csökkenthetik az energiafogyasztást. A biomedicinában a mikro-/nanoszerkezetek alkalmazhatók gyógyszeradagoló rendszerek, bioszenzorok, mesterséges szervek készítéséhez, ami elősegítheti az egészségügyi beavatkozások hatékonyságát és a betegségek diagnosztizálásának pontosságát. Végül a mikro-/nanoszerkezetek fontos szerepet játszanak az anyagtudomány területén, segítve a könnyebb és nagyobb szilárdságú anyagok létrehozását és azok kopásállóságának és korrózióállóságának növelését [11].

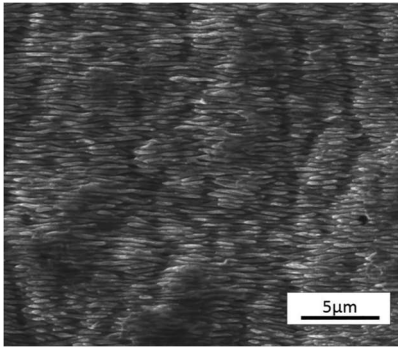
Tatsuya Sugihara és munkatársa Toshiyuki Enomoto mikrolyukasztott felületű váltólapkákat fejlesztettek a szerszámok éltartamának javítása érdekében, és összehasonlító értékelés történt a mikrolyukak és mikrobarázdák között. A kutatás eredményei szerint a mikrolyukasztott felület hatékonyan csökkenti a kráteres kopást és javítja a kopásállóságot száraz vágási körülmények között is. A textúrált felület mikrotárolóként és szolgál a hűtőfolyadéknak és a kopás során leváló anyagrésznek, ezáltal növelve a hátlap kopásállóságát. A kísérleti eredmények alapján a zárt forma szerkezetek, mint például a mikrolyukak, jobb teljesítményt mutattak szigorúbb kenőközegben, míg a nyitott forma szerkezetek is kielégítően működtek nagy mennyiségű hűtőfolyadék használata esetén [12]. A 4. ábra mutatja be a felülettextúrált váltólapka megoldásokat.



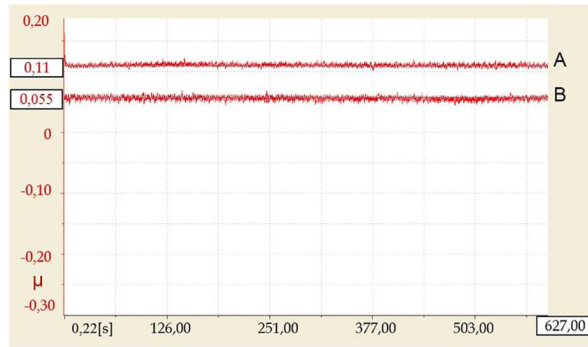
4. ábra: Forgácsoló váltólapka homloklapjának lézeres textúrázása [12]

Voznesenskaya és munkatársai molibdén felszínén hoztak létre lézerrel periodikus felületeket, melyekkel jelentős mértékben csökkentették a súrlódási együtthatót. A femtoszekundumos lézeres kezelés eredményeként a fém mintadarab kisebb súrlódási együtthatót és kopást mutatott, ami kiemeli a lézerrel készített periodikus felületi

szerkezetek nagy potenciálját a tribológiai alkalmazásokban. Az újonnan kialakított felületi mikrodomborzat nemcsak a kenőanyag megtartásában segít, hanem csökkenti az érintkező felületek közötti kontaktus területét is [13]. A molibdén felszínén létrehozott lézerindukált periodikus felületi struktúrát (LIPSS) mutatja a 5. ábra, az 6. ábra pedig felülettel elért súrlódási együttható csökkenést ábrázolja.

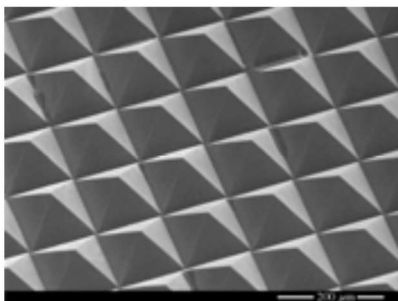


5. ábra: SEM felvétel a molibdén felszínén létrejött periodikus szerkezeteket, melyeket a 1,5 W teljesítményű femtoszekundumos lézeres besugárzás eredményezett. [13]

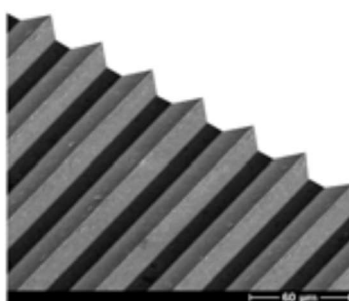


6. ábra: A súrlódási együttható grafikonja - molibdén: A- kezeletlen minta, B- kezelt minta [13]

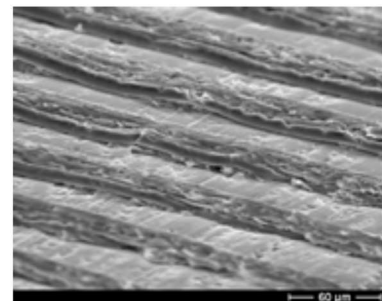
Petterson értekezésében mikrostruktúrált gyémánt felületeket alkalmazott nagy súrlódású felületekként és meghatározta a statikus súrlódási együtthatót acéllal vagy alumíniummal szemben kenőanyag felhasználása mellett. A különböző gyémántfelületek alakzatait és orientációit tesztelte különböző terhelések mellett és az elméleti modellek összehasonlíthatók voltak a kísérleti eredményekkel. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyémántfelületek rendkívül magas statikus súrlódási együtthatót mutatnak, ami jelentős gyakorlati értékkel bír a nagy súrlódású alkalmazásokban és hozzájárul az elméleti modellek validálásához [9]. A 7. ábra az alkalmazott gyémántszerszámokat és a létrehozott felületet mutatja be.



a)



b)



c)

7. ábra: Gyémánt felületek a) gúla mintázat, b) bordázat és c) súrlódási nyomok alumínium felületén [9]

3. Kutatómunka során alkalmazott anyag és módszerek

3.1. Vizsgálandó anyag kiválasztása

A szerszámacélok fontos szerepet töltenek be a különböző ipari folyamatokban, különösen azokban, ahol nagy igény van a keménységre, kopás- és hőállóságra. Az egyik legfontosabb és legelterjedtebb szerszámacél típus a HSS, vagyis a High-Speed Steel, vagy magyarul gyorsacél. A HSS gyorsacélok olyan speciális acélok, amelyek nagy keménységűek, kopás- és hőállóak, így képesek magas vágósebességgel dolgozni anélkül, hogy túlzottan deformálódnának vagy megolvadnának. Ezek a tulajdonságok teszik őket ideális választássá olyan alkalmazásokhoz, ahol nagy sebességgel kell vágni, alakítani vagy megmunkálni a munkadarabokat. A HSS gyorsacélok összetétele általában magas szén- és ötvözőanyag-tartalommal rendelkezik, például kobalt, wolfram, molibdén és/vagy vanádium. Ezek az összetevők, stabil kemény karbidok formájában hozzájárulnak az acél keménységéhez, kopásállóságához és hőállóságához. A kobalt például segít abban, hogy az acél keménysége és kopásállósága még magasabb legyen, míg a wolfram és a molibdén növeli az acél hőállóságát és vágóképességét. A HSS gyorsacélok széles körben használatosak olyan alkalmazásokban, mint például fúrók, marók, esztergák, menetfúrók, illetve különböző vágószerszámok és formázószerszámok. Emellett az ipari gépek és berendezések gyártásában is gyakran alkalmazzák őket.

Az általam vizsgálni kívánt szerszámanyag is ebbe a csoportba tartozik.

A 2. táblázatban összefoglalom az R2-es jelölésű gyorsacél tulajdonságait.

2. táblázat: A vizsgált anyag tulajdonságai [14]

HSS Gyorsacél (R2)						
Összetétele:	C%	Cr%	W%	Mo%	V%	Co%
	0,74-0,84	3,8-4,6	17,5-19	0,7-1	1,2-1,5	4,5-5,5
Keménység:	Edzett állapotban:			63 HRC		
	Megeresztett állapotban:			67 HRC		
Felhasználási terület:	Nagyszilárdságú és nehezen megmunkálható acélok forgácsolásához.					

A lézeres kezelést megelőzően a próbatestek a metallográfiai vizsgálatnak megfelelő előkészítést kaptak, amely során síkköszörűvel lett beállítva a kiinduló felületi érdesség.

3.2. Az alkalmazott lézertechnológia

Az ultrarövid impulzusú lézertechnológia egy olyan fejlett lézeres eljárás, amely rendkívül rövid impulzusidőt alkalmaz a lézerfény kibocsátására. Az ultrarövid impulzusok általában a femtoszekundum (10^{-15} másodperc) és a pikoszekundum

(10^{-12} másodperc) tartományba esnek. Ezek a rendkívül rövid időintervallumok lehetővé teszik a lézerfény nagy energiasűrűségű fókuszálását, ami számos ipari és tudományos alkalmazásban kiemelkedő teljesítményt nyújt.

A technológia lehetővé teszi a lézerfény nagyon kicsi területre történő fókuszálását, ami nagy felbontást és pontosságot eredményez a mikrométerű struktúrák létrehozása során, valamint minimalizálják a hőmérsékleti hatásokat és a hővezetést az anyagban. Ez különösen fontos az érzékeny anyagok, például biológiai minták vagy elektronikai alkatrészek kezelése során. Az ultrarövid impulzusú lézerek széles körű anyagkompatibilitást kínálnak, beleértve a fémeket, műanyagot, üveget és egyéb anyagokat is és lehetővé teszik a precíziós mikromegmunkálást, például mikrofuratok készítését, mikrométerű gravírozást és mikroszerkezetek létrehozását, amelyeket hagyományos eszközökkel nehéz vagy lehetetlen lenne elérni, így téve vonzóvá a különböző iparágak számára.

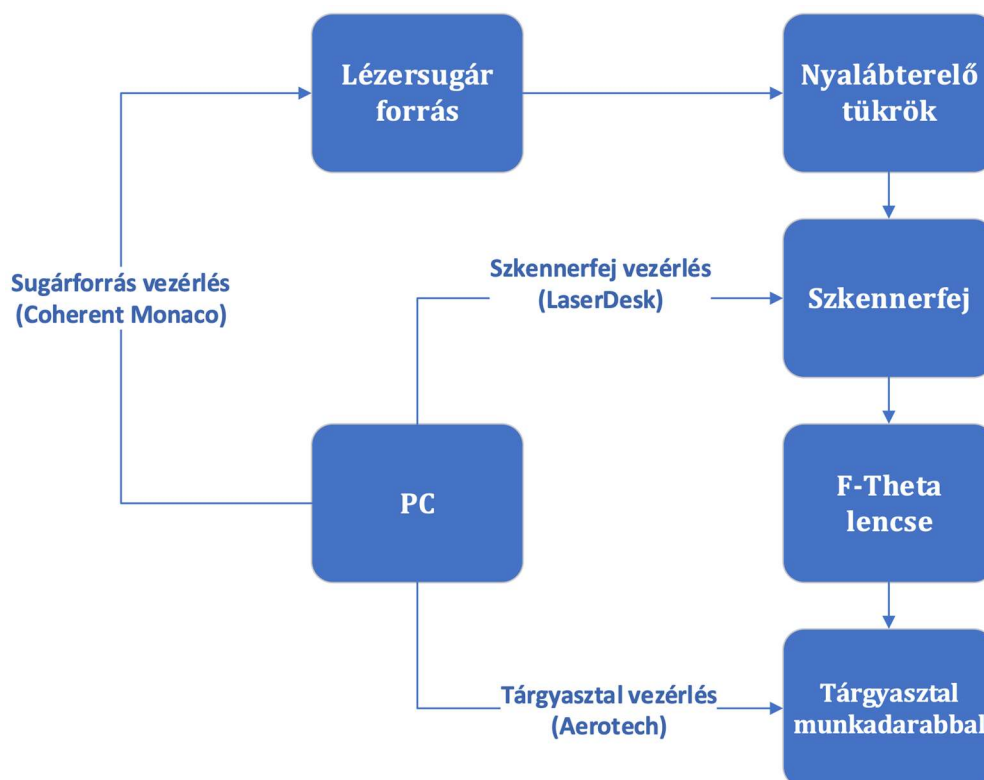
Az általam használt lézerberendezés tulajdonságait a 3. táblázatban foglalom össze. A kísérleteket munkahelyemen a Neumann János Egyetem GAMF-Karán, a Diódalézer Központban végeztem el.

3. táblázat: Lézerberendezés technikai adatai

Coherent Monaco 1035-60-80	
Hullámhossz:	1035 nm
Teljesítmény:	60 W
Besugárzott energia:	80 μ J
Frekvencia:	188 kHz – 50 MHz
Fókusz távolság:	250 mm
Impulzus szélessége:	277 fs
Fókuszált folt átmérője, sugárminőség:	80 μ m, TEM ₀₀ , $R^2 < 1,2$

A berendezés sematikus vázlatát a 8. ábra mutatja. Az összes komponens integrációját egy központi számítógép végzi, amely lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy intuitív felhasználói felületen keresztül könnyedén konfigurálják és vezéreljék a rendszert. A lézersugárforrást a Coherent szoftverén keresztül lehet vezérelni. Ezen belül állítható például a frekvencia és az impulzus szélessége, valamint itt lehet engedélyezni, hogy érkezhessen-e nyaláb a sugárforrásból és a különböző hibaüzenetek is ezen a felületen olvashatók. A lézeres felületkezelést ScanLab vállalat által gyártott szkennervej, valamint LaserDesk szoftvere támogatja, amelyben grafikus környezetben lehet a kívánt „szerszámpályát” meghatározni, természetesen a szkennelési- és lézerparaméterek megadásával egyidőben. A szkennervejben két nagy pontosságú galvomotorra szerelt, X- és Y-tengelyen térítő tükör segítségével valósul meg a pásztázás, annak érdekében pedig, hogy a teljes megmunkálási tartományon belül a tárgyasztalra merőlegesen érkezzenek a nyalábok egy 250 mm-es fókusz síkú F-Theta lencse gondoskodik. A rendszerhez tartozik

még a hőmérséklet szabályozására szolgáló hűtőberendezés, valamint egy Aerotech gyártmányú X-tengely, amely forgatható, hasonlóan egy esztergagép főorsójához, így lehetővé téve palásfelületek kezelését is.



8. ábra: A femtoszekundumos lézerberendezés sematikus ábrája

3.3. Pásztázó elektronmikroszkópia

A pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) egy olyan speciális típusú elektronmikroszkópiai eljárás, amelyet általában anyagi minták felületének nagyítására és vizsgálatára használnak. A SEM rendkívül hasznos eszköz a nanotechnológia, anyagtudomány, geológia, biológia és más területeken történő kutatásokban. A működési elve alapvetően, hogy az elektronokat fókuszált elektronnyaláb formájában bocsátják ki egy minta felületére. Ezek az elektronok kölcsönhatásba lépnek a mintával, minek eredményeképp számos jel keletkezik, amelyet különböző detektorokkal különböző célra rögzít a rendszer. A leggyakoribb eljárás a visszaszórt és szekunder elektronok detektálása képalkotás céljából és a keletkezett röntgennyaláb érzékelése kémiai összetétel meghatározása céljából. Ennek megfelelően a SEM rendkívül nagy nagyítási és felbontási képességgel rendelkezik, ami lehetővé teszi a próbatest részletes vizsgálatát nagyon kicsi részletekig. Emellett a SEM képes vizsgálni a minta topográfiáját és összetételét is, ami fontos információkat nyújt annak szerkezetéről és tulajdonságairól.

A lézersugaras felületkezeléséhez vizsgálati módszerként a Miskolci Egyetem 3DLaborjában található Thermo Scientific Helios G4 típusú, fókuszált ionnyalábbal ellátott pásztázó elektronmikroszkópot (FIB SEM) használtam, tulajdonságait a 4. táblázat tartalmazza. A konvencionális SEM rendszerekhez képest az elektronnyalábot egy fókuszált ion nyaláb is kiegészíti, mely a mikroszkóp térben történő mintamegmunkálást és képalkotást is lehetővé tesz. Ebben a mikroszkópban az általánosan elterjedt Ga FIB-ektől elérően Xe forrás működik. A Xe egy nagy méretű ion lévén sokkal hatékonyabb mintamegmunkálást tesz lehetővé.

A vizsgálat során az előkészített mintákat öntapadó rézszalaggal rögzítettük a tárgyasztalhoz, ezzel megakadályozva a tárgyasztal esetleges bedöntéséből fakadó elmozdulást.

4. táblázat: Az alkalmazott pásztázó elektronmikroszkóp technikai jellemzői és a vizsgálati paraméterek

Thermo Scientific Helios G4	
Elektron forrás:	Schottky-féle termikus kibocsátó
Elektron-forrás áramerősség:	0,8 pA-tól 100 nA-ig
Ion-forrás:	Induktív kapcsolású Xe+ plazma
Ion-forrás áramerősség:	1 pA-tól 2,5 µA-ig
Elektronmikroszkóp	
• Felbontás (2-15 kV között):	0,6 nm
• Felbontás (1 kV):	0,7 nm
• Felbontás (500 V között):	1 nm
FIB felbontás:	
• statisztikai módszerrel	20 nm
• szelektív él módszerrel	10 nm
Vizsgálati paraméterek:	
Gyorsító feszültség:	20000 kV
Jellemző nagyítások:	1000x - 2,500x - 5000x - 10000x

4. A kísérleti mátrix és az eredmények bemutatása

A lézer-anyag kölcsönhatás lejátszódása közben számtalan változó együttes hatása érvényesül, amelyekre csupán korlátozottan vagyunk hatással. Annak érdekében, hogy a folyamatokat részben vagy egészben megérthessem, elemi lépésekben kell haladnom és meg kell fogalmaznom, hogy a kísérletek elvégzését követően milyen jellemzőket vizsgállok. Mivel felületmódosítást hajtok végre és anyageltávolítás is történik, ezért érdemes a következő paramétereket vizsgálni:

- a keletkezett vonal/árok szélessége, mélysége
- járulékos hatások (hőhatásövezet, mikrorepedések)

A hőhatásövet az, amelyben anyagszerkezeti változás történhet. Itt lehetnek mikrorepedések, amelyek a szerszámanyag gyorsabb tönkremeneteléhez vezethetnek, valamint az esetlegesen újrakristályosodott fázis jelenléte is további vizsgálatok tárgyát képezheti. A lézeres kezelés paramétereit a pásztázó-elektronmikroszkópos vizsgálatokból kapott adatokra támaszkodva változtatom, így közelítve egy olyan felületi mintázati eredményhez, amely alkalmas lehet arra, hogy a későbbiekben tribológiai tesztek alá vessük.

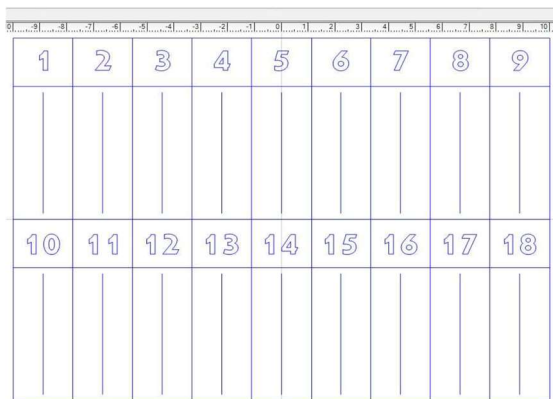
4.1. A lézeres kezelés paramétereit

A felületkezelés paraméterének közelítéséhez a femtoszekundumos lézerberendezés optimális munkapontjához (referenciaszint) igazítottam az első kísérlettervet. A *Coherent Monaco 1035-60-80* esetében ez azt jelenti, hogy a maximális impulzusenergiát, ami **80 μ J-t** jelent és **60 W** teljesítmény mellett, **750 kHz** frekvencián képes leadni. A referencia szinthez tartozó kísérlettervet az első mintán az **5. táblázat** tartalmazza, amelyben 18 db eltérő kezelést alkalmaztam.

5. táblázat: Referenciaszinttel alkalmazott kísérletterve

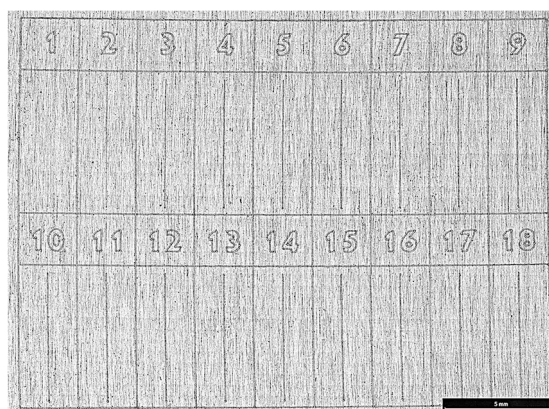
Rögzített paraméterek:	Frekvencia (f):						750 kHz	
	Pásztázási sebesség (v):						1 m/s	
	Vonalismétlések száma:						1	
Változó paraméterek:	Besugárzott energia: (E):						12-80 μJ	
	Teljesítmény (P):						9-60 W	
1. Minta kezelési pozíciók (1-18)								
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
9 W	12 W	15 W	18 W	21 W	24 W	27 W	30 W	33 W
12 μJ	16 μJ	20 μJ	24 μJ	28 μJ	32 μJ	36μJ	40 μJ	44 μJ
10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.
36 W	39 W	42 W	45 W	48 W	51 W	54 W	57 W	60 W
48 μJ	52 μJ	54 μJ	60 μJ	64 μJ	68 μJ	72 μJ	76 μJ	80 μJ

Az egyes kezelések egyenes vonal mentén, kb. 6 mm hosszan történtek minden esetben. Az egyes vonalakat olyan távol helyeztem el egymástól, hogy az egymásra hatás ne következhesse be. A 9. ábra mutatja az első kísérletterv programbeli elrendezését, a 10. ábra pedig az elektronmikroszkópos (SE) mozaik felvételt a mintán készített kezelésről. Az 5. táblázatnak megfelelően alakítottam ki a kezelési programot. A két sorba osztott táblázatos elrendezést megtartottam, ahol a sorszámok alatt találhatóak azonos távolságra a vizsgálni kívánt egyenes szakaszok, így a mikroszkópos mérések során ugyanakkora utat kell bejárni két vonalparaméter között. A táblázat határvonalainál és az azonosító számok gravírozásánál a kezelési paraméterektől eltérően az erre a célra szokásos értékeket használtam, ami 45 W teljesítményt és 750 kHz frekvenciát jelent.



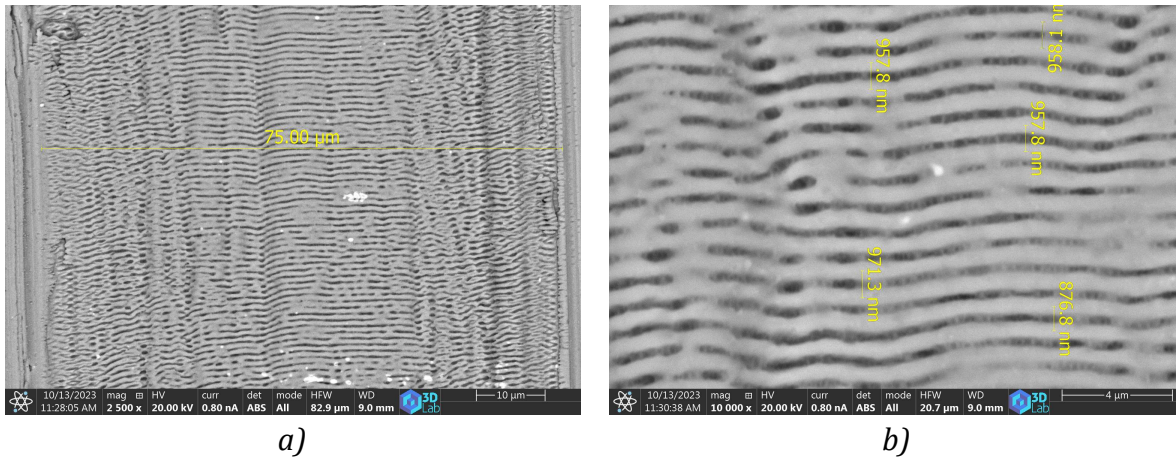
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18

9. ábra: 1. minta elrendezése a lézer kezelési szoftverének grafikus felületén



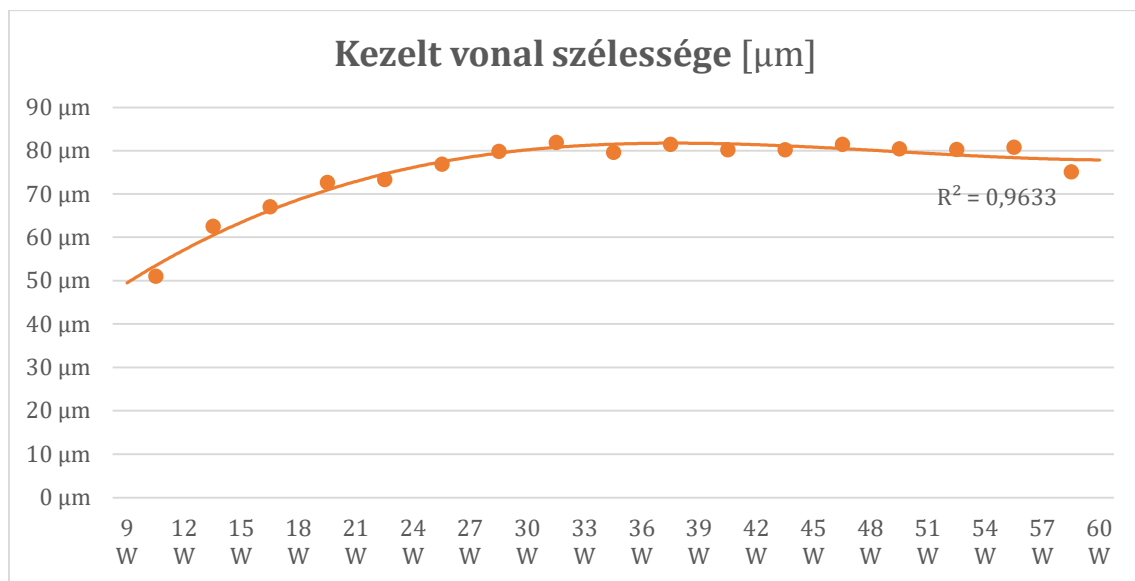
10. ábra: 1. mintán létrehozott kezelések SEM mozaik felvétele

A kiterjedt felületek előállítása előtt az elemi vonalak kialakítását preferáltam, mivel ezáltal optimalizálhatóvá válik a kísérleti elrendezés, és a mérések végrehajtása is hatékonyabbá válik. Ez a megközelítés segíti a pontosabb eredmények elérését és a folyamat egyszerűsítését. Az 1. minta kiértékelésénél a kezelt vonal szélességét határoztam meg. A mikroszkóp szoftverében lehetőség van mérések elvégzésére is a készült felvételeken. Minden egyes kezelési pozícióban, három helyen, a kezelt vonal középső harmadában, a kezelt sávra merőlegesen kijelöltük azt a távolságot, amit szubjektíven a kezelés hatásának gondoltunk. A három mérési hely számtani átlagával jellemeztük a kezelt vonal szélességét (11. ábra, a)). A 11. ábra b) mutatja egy kezelési helynek a nagyobb felbontású képén a kialakult lézerindukált periodikus felületi mintázatot (LIPSS), amely egy további lehetséges módja a súrlódás nano skálán történő módosításának [13]. Elektronmikroszkópos méréseink során megmértük a LIPSS periódusának távolságát is, a 17. sorszámú kezelési helyen.



11. ábra: a) A kezelt vonal szélességének mérése (17-es pozíció) b) A keletkezett struktúra periódusának távolsága

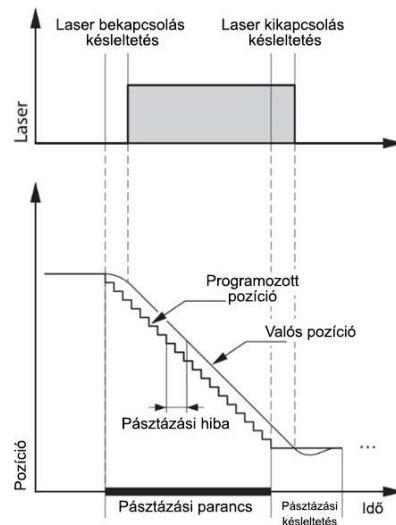
A 12. ábra a kezelt vonal szélességének változását mutatja a teljesítmény függvényében. Az alacsonyabb teljesítményszinteken a vonalvastagság 50..70 µm, de a teljesítményszint 50%-os növelésére a kezelt vonal vastagsága eléri a berendezéssel elérhető maximumot, ami 80 µm-t jelent. Vagyis az árok méretének növelése a teljesítmény növelésével egy bizonyos határon túl már nem növelhető. A teljesítmény fokozása egy határon túl már káros is lehet a túlzott energiabevitelnek köszönhetően.



12. ábra: Kezelt vonal szélessége a teljesítmény függvényében az 1. mintán

Fontos megjegyezni, hogy a szkennervejben lévő tükrök mozgását biztosító galvomotoroknak is van gyorsulása, lassulása, valamint lendülete. Ami azt eredményezi, hogy a kezelt felület eltérő lehet a vonal elején, közepén és végén. Ennek az adottságnak a korrekciójára a programozási környezetben állítható a nyaláb be- és kicsatolásának késleltetése, aminek elmulasztása azt eredményezheti, hogy nem azt a szkennelt pályát

kapjuk, mint amit programoztunk, vagy a pálya különböző szakaszain eltérő vonalenergiával zajlik a kezelés. A 13. ábra bemutatja, hogy miként zajlik a szkennelés vezérlése, milyen időszükségletek és késleltetések vannak a rendszerben.



13. ábra: Programozott és valós pozíció szkennelés közben [15]

Az eddigi labortapasztalatok azt mutatták, hogy a késleltetési idők bonyolult meghatározása helyett, praktikusán jóval hosszabb vonalak programozását hajtjuk végre, hogy elegendő időt biztosíthassunk a gyorsulásra és lassulásra, így a paraméterek hatásának vizsgálatát a létrehozott vonalak hosszának kb. felénél végezzük el. Ezt a gyakorlatot folytattam a teljes kísérletsorozat alatt.

Az 1. minta eredményei alapján a további kísérleteknél az árkok méretének növelése a célunk. A nagyobb geometriákat egyetlen egyszeri pásztázással nem lehetséges előállítani mert nem lehetséges nagy mennyiségű anyag eltávolítása. Többszöri pásztázás szükséges, amely programozható paraméterként megadható a szoftverben. A pásztázásokat az ismétlések alkalmával ugyanazon helyen végeztük. Az ismétlések között eltelt idő nagyságrendje pikoszekundum értékű.

A kísérlet második sorozatában is közel kívántam maradni a munkaponthoz, ezért úgy döntöttem, hogy az egyik módosítandó paraméter a lézernyaláb frekvenciája lesz és a teljesítményt a maximális 60 W értéken tartom. A frekvencia változtatásánál figyelembe kell venni, hogy csökken az anyaggal közölt energia. A 6. táblázatban összefoglalom, hogy beállítható lézerfrekvenciák mellett mekkora energia érhető el.

6. táblázat: A programozható frekvenciaszintek mellett elérhető energiabevitel

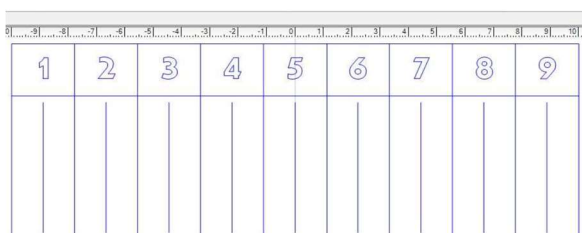
Frekvencia [MHz]	Energia [μ J]
0,75	80
1	60
2	30
4	15
10	6
50	1,2

A 2. minta kísérlettervében a magasabb frekvenciákon vizsgálom az ismétlések hatását a nagyobb eltávolítható anyagmennyiség érdekében. Ez azért előnyös, mert amellet, hogy rendelkezésre áll az anyag eltávolításához szükséges energia, a magasabb frekvenciaszint tisztító hatást is kifejt a kezelt anyagrészre, ami kedvező a szabályozott geometriák előállításában.

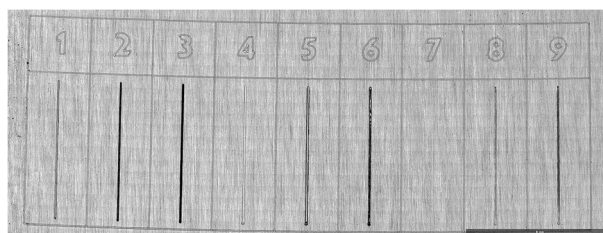
A kísérlettervet a 7. táblázatban foglalom össze, míg a szoftveres és a mintán lévő kezelési nyom elektronmikroszkópos felvételét a 14. ábra és 15. ábra mutatja be. Az 1. mintához képest a vizsgált paraméter kombinációk számát csökkentettük 9-re. A pálya szkennelési programozásának logikája változatlan maradt.

7. táblázat: A 2. minta kísérletterve

Rögzített paraméterek:			Pásztázási sebesség (v_m):				1 m/s	
			Teljesítmény (P):				60 W	
Változó paraméterek:			Frekvencia					
			Ismétlések száma					
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
2 MHz	2 MHz	2 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz	50 MHz	50 MHz	50 MHz
10 ism.	50 ism.	100 ism.	10 ism.	50 ism.	100 ism.	10 ism.	50 ism.	100 ism.



14. ábra: 2. minta elrendezése a szoftver grafikus felületén



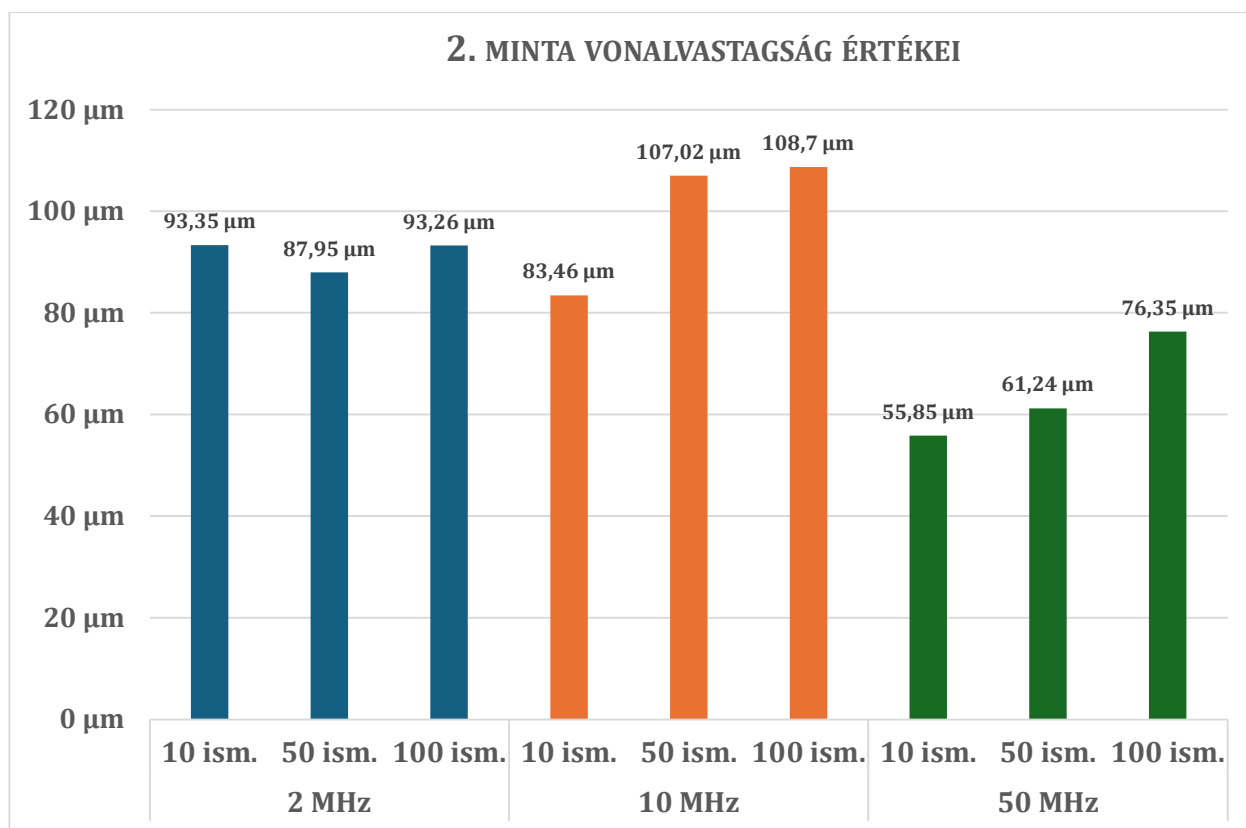
15. ábra: 1. mintán létrehozott kezelések SEM mozaik felvétele

A 2. minta kiértékeléséhez komplexebb mintaelőkészítésre volt szükség, hiszen ebben a kísérletben az eltávolított térfogat geometriája mellett az anyagszerkezetben történt változásokat is vizsgálni kívántuk. A mérési eseménykor nem állt rendelkezésünkre a fókuszált ionnyaláb kicsatolásához szükséges Xenon gáz, így közvetlenül a mikroszkópon belül nem tudtunk bemetszést készíteni mintán. Alternatívaként a mintát a mérés helyén elvágva műgyantába ágyaztuk Struers melegbeágyazó készülékkel és keresztmetszeti csiszolatot készítettünk. A négyfokozatú csiszolást és polírozást követően maratást végeztünk 2%-os nital oldattal. A maratás hatására láthatóvá válnak a szemcsehatárok, így alkalmassá téve a mintát az elektronmikroszkópos szöveti vizsgálatra is.

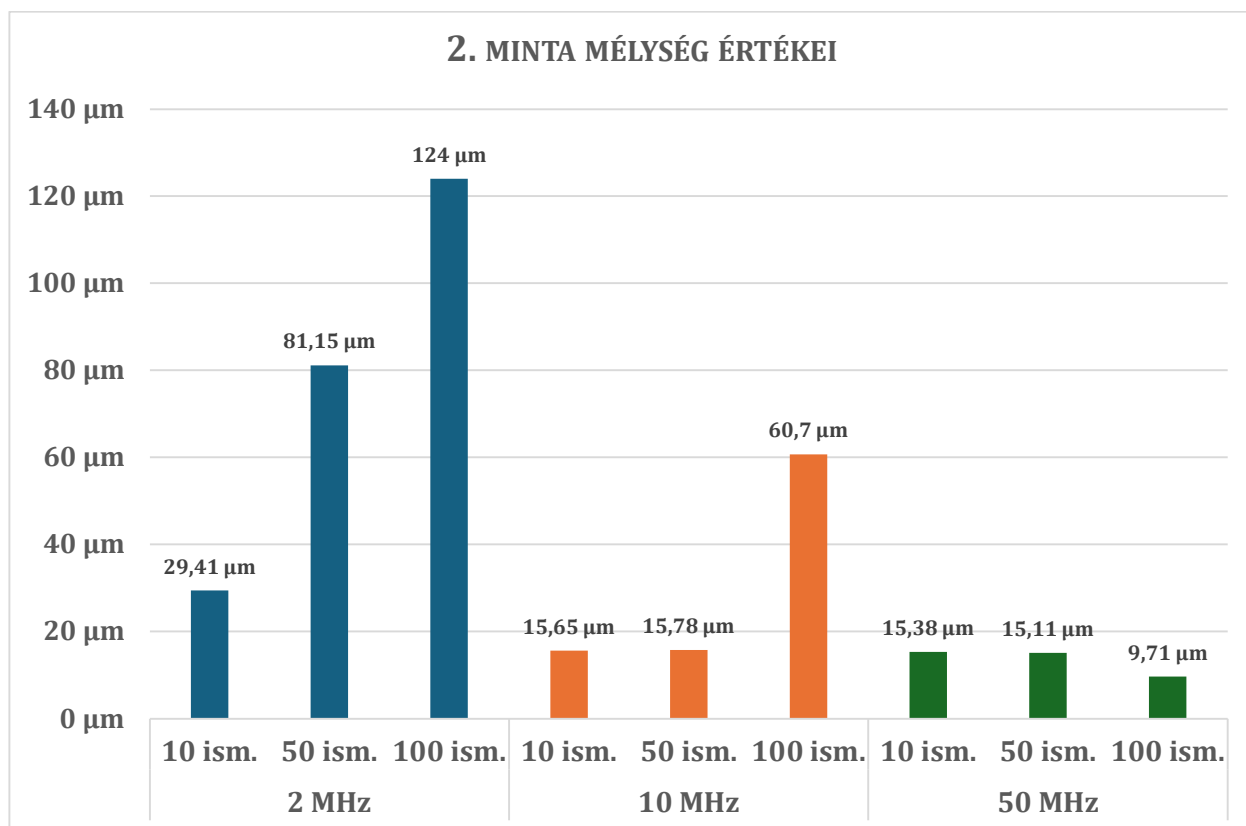
A vizsgált frekvenciák különböző elváltozásokat okoztak az anyag felületén és belsejében, amelyek további kísérletek elvégzésének szükségességét vetítik előre. A 8. táblázatban és a 16. ábra, 17. ábra diagramjain összefoglalom a mérés eredményeit, majd bemutatom az elektronmikroszkópos felvételeket. Minden vizsgált paraméterről készült egy felvétel 0° és 45° -os tárgyasztal bedöntéssel, valamint egy keresztmetszeti kép. Utóbbin az anyagszerkezeti változásokról nagyobb nagyítású felvételt is készítettünk.

8. táblázat: 2. minta mérési eredményei

2. Minta		Árok szélessége [μm]	Hőhatásövezet [μm]	Hőhatásövezet keménysége [$HV0.1$]	Árok mélysége [μm]	Repedés [μm]
2 MHz						
1.	10 ism.	93,35	7,5	672	29,41	-
2.	50 ism.	87,95	5	694	81,15	21,04
3.	100 ism.	93,26	5	603	124	27,63
10 MHz						
1.	10 ism.	83,46	15,65	629	15,65	-
2.	50 ism.	107,02	5	690	15,78	-
3.	100 ism.	108,7	10	722	60,7	-
50 MHz						
1.	10 ism.	55,85	15,38	406	15,38	-
2.	50 ism.	61,24	5,6	617	15,11	-
3.	100 ism.	76,35	6,45	653	9,71	-



16. ábra: 2. minta vonalvastagság értékei

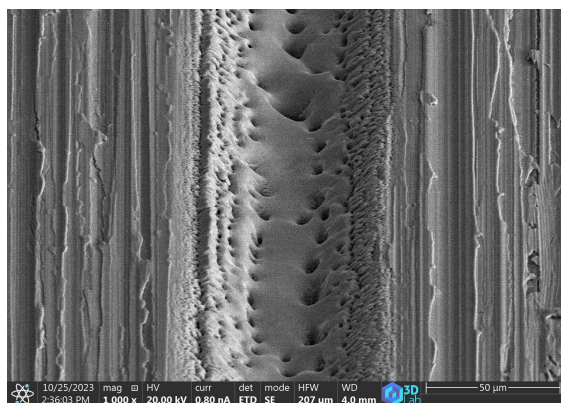


17. ábra: 2. minta mélység értékei

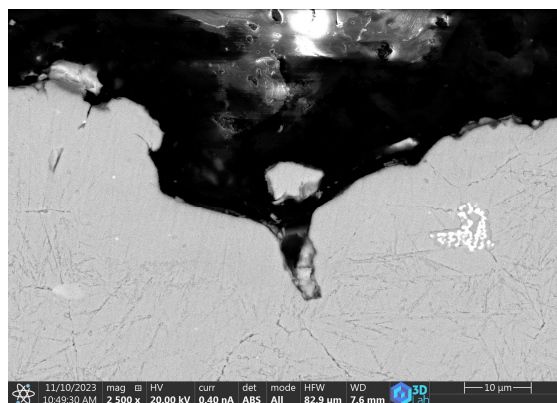
A 8. táblázat összefoglalásaként, az előzetes várakozásoknak megfelelően a frekvencia növelésével csökkent az árok szélessége és mélysége egyaránt, ellenben mérhető volt minden frekvenciaszinten hőhatásövezet és 2 MHz-en mikrorepedés is megjelent.

A 2. minta 2MHz-es paramétereinek finomszerkezeti vizsgálatát a 18. ábra-26. ábra: Átolvasztott réteg sorozat mutatja be. Az elektronmikroszkópos felvételek alapján érzékelhető az a folyamat, amelynek során az először az önszerveződés eredményeként létrejött LIPSS felbomlik, egyre nagyobb mikroyukakká alakul, majd megindul az anyageltávolítás és az ismétlések számának növelésével fokozatosan növekszik az árok mélysége. A 19. ábra alapján elmondhatjuk, hogy 10 ismétlés még nem alakít ki szabályos geometriát, a keresztmetszet alakja nagyban függ attól, hogy hol vesszük ki a keresztmetszeti mintát. A 20. ábra mutatja a legszabályosabb geometriát, feltehetően a geometria kevésbé függ a keresztmetszet helyétől. Tovább növelve az ismétlésszámot (23. ábra) az anyaggal közölt energia mennyisége olyan heves és kaotikus folyamatot eredményez, amelyben számos nem kívánt jelenség történik. Hasonlóan a hosszabb impulzusú lézerekhez, az energiabevitel egy folyamatos olvadékfürdőt tart fenn, ami kissé zárttá teszi az árok alját, amelyben minden irányban mikrorepedések indulhatnak meg. Az anyageltávolítás mellett közvetlenül megjelentek a hőhatásövezetek (24. ábra), mikrorepedések (25. ábra), amelyek rendszerint kristályhatárok mentén alakulnak ki, valamint a legkevésbé kívánatos mellékhatás, az átolvasztott réteg (26. ábra), ami jelen van az árkok falain. Ezeket a mellékhatásokat egyértelműen a túlzott energiabevitel okozta.

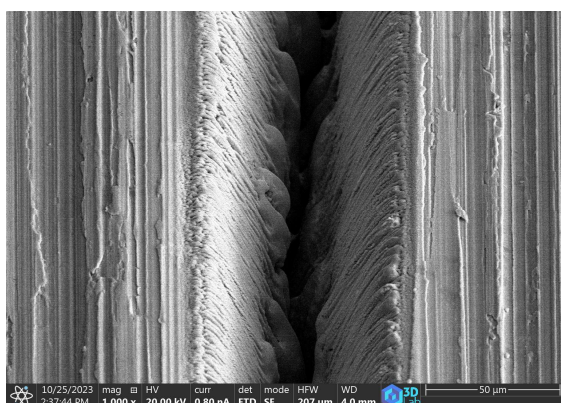
A hőhatásövezetben bekövetkező anyagszerkezeti változásokat keménységméréssel is meg kívántuk vizsgálni. Az alkalmazott eljárás a microvickers mérés, amely mikro- és nanostrukturált anyagoknál, valamint vékonyrétegek és bevonatok esetében elterjedt módszer. Az alapszövet keménysége 764 HV0.1 keménységű, ehhez képest a hőhatásövezetben, minden frekvenciaszinten csökkenés tapasztalható (8. táblázat): A lézeres expozíció következtében az anyag hőmérséklete jelentősen emelkedik, ami különféle mikroszerkezeti változásokhoz vezet, mint például a szemcseméret növekedése vagy a diszlokációk számának változása. Ezek a változások a keménység csökkenését vonják maguk után. Fontos megérteni és kontrollálni a lézeres anyageltávolítás hatásait az anyag keménységére nézve is, hogy optimalizálni lehessen a paramétereket és minimalizálni a hőhatásövezetet.



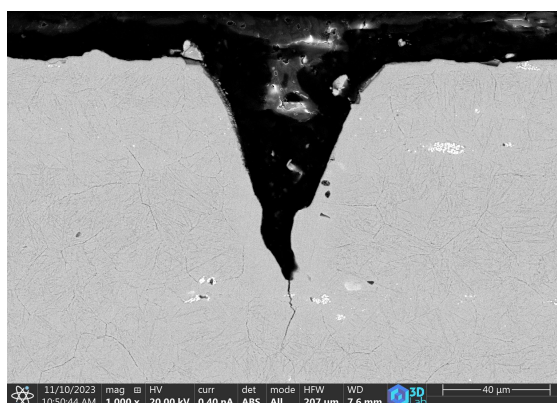
18. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=10$



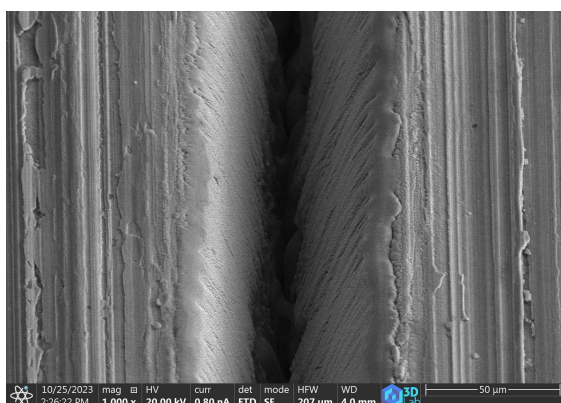
19. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=10$ keresztmetszete



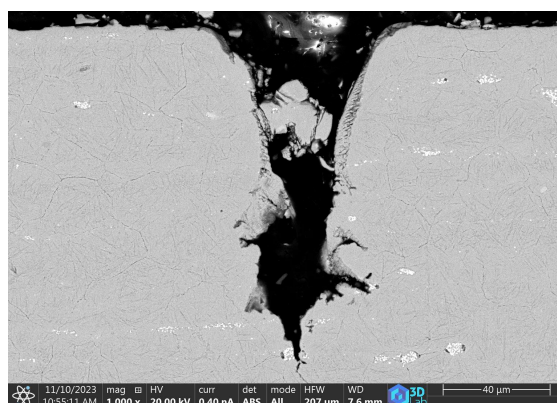
20. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=50$



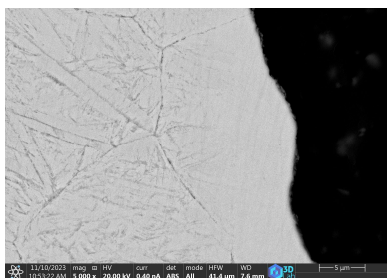
21. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=50$ keresztmetszete



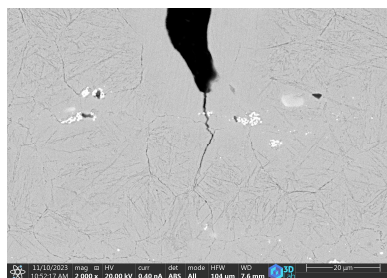
22. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=100$



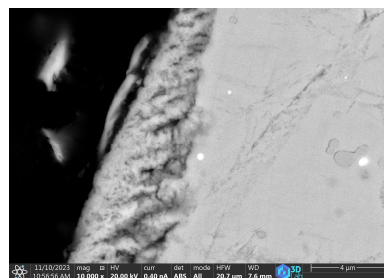
23. ábra: $f=2\text{MHz}$, $\text{ism.}=100$
keresztmetszete



24. ábra: Hőhatásövezet



25. ábra: Mikrorepedés

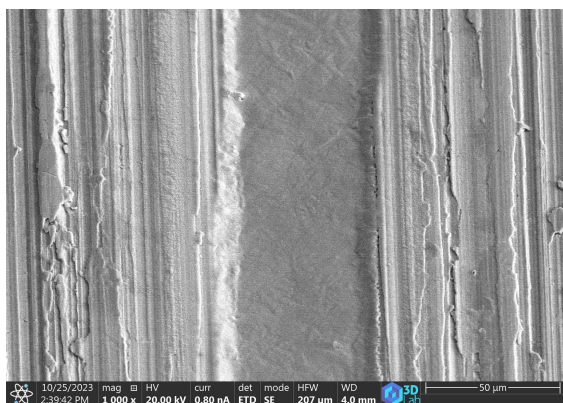


26. ábra: Átolvasztott réteg

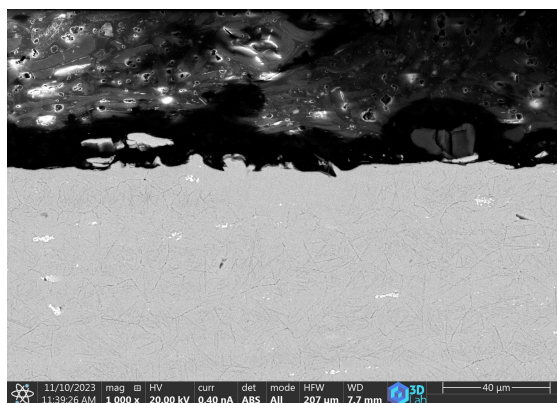
A 2. minta a 10 MHz-es frekvenciaszintjének elektronmikroszkópos felvételeit a 27. ábra-34. ábra képei mutatják be. Sorban haladva a 27. ábra és a 28. ábra szerint a 10 ismétléses kezelés nem eredményezett számottevő anyageltávolítást, mindössze egy simító műveletet hajtott végre, aminek következtében megszűntek a felületi egyenetlenségek. A keresztmetszeti felvétel (28. ábra) arra enged következtetni, hogy az alakítás nagyban függ a keresztmetszeti minta készítésének helyétől.

Jelentősebb anyageltávolítás következik be az ismétlésszám 50-re történő növelésével (29. ábra-30. ábra), de a keletkezett árok geometriája jelentősen eltér a 2 MHz 50-es ismétlésszámánál tapasztalttól (21. ábra). Míg az alacsonyabb frekvenciás kezelésnél egy éles bemetszés alakult ki, addig 10 MHz-en egy lekerekítettebb geometria jött létre. A mikrorepedések megjelenése szempontjából az utóbbi előnyösebb lehet, hiszen nincsenek a geometriából adódó feszültséggyűjtő helyek, ahol a repedések meg tudnának indulni és kevésbé függ a metszet készítésének helyétől sem, ellenben hátrány lehet a hőhatásövezet, átolvasztott réteg és felületi sérülés jelenléte (33. ábra). A létrejött geometria használhatósága nagyban függ attól az igénytől, hogy milyen irányban szeretnénk módosítani a súrlódási tényezőket, mennyire kell éles felületeket létrehoznunk.

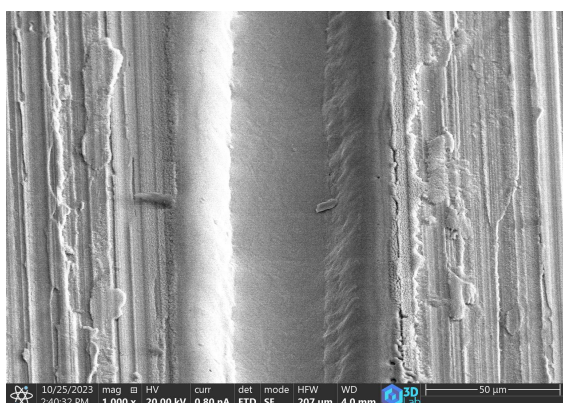
Amikor 100-as értékre emeltük az ismétlésszámot, újból azt tapasztaltuk, hogy jelentős az átolvasztott anyagrész mennyisége (31. ábra-32. ábra). Ennek az lehet az oka, hogy ezen a frekvencián kevésbé érvényesül az abláció jelensége és az egymást követő ismétlések során az energia nagy része csak melegíti az anyagot, aminek hatására az megolvad. Az impulzusok okozta lökéshullámok miatt az olvadákfázis kontroll nélkül oszlik el az árokban, ezért ezt sem tekinthetjük optimális paraméternek, hiszen teljesen véletlenszerű felvételeket kapnánk a különböző metszetekben. Az újraolvasztott anyagrész jelentőségére figyelemmel kell lenni a frekvencia és az ismétlésszám optimális egyensúlyának megtalálása során, hogy minimalizáljuk az anyag strukturális változásait és megőrizzük a pontosabb, reprodukálható eredmények elérésének lehetőségét.



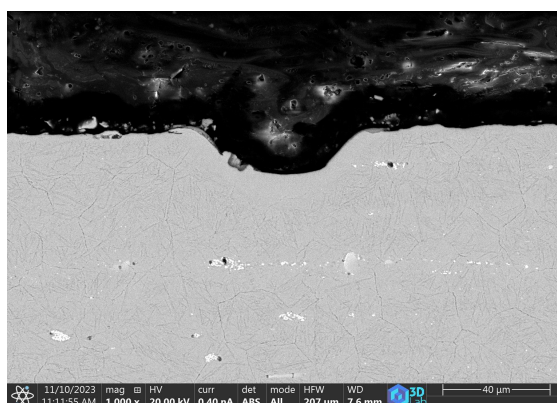
27. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=10$



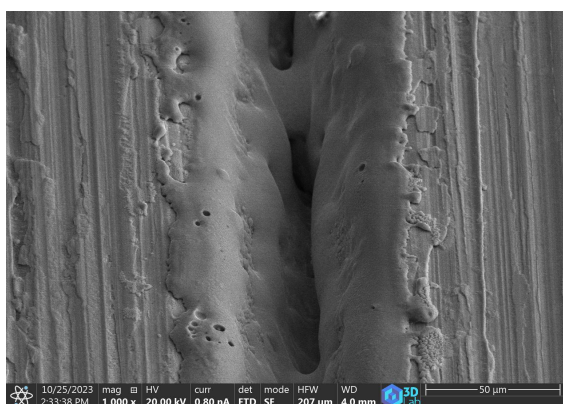
28. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=10$
keresztmetszete



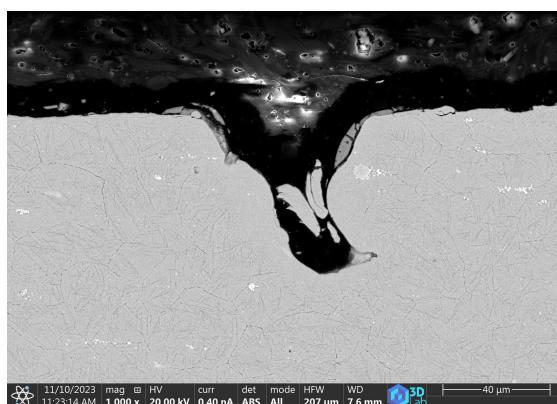
29. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=50$



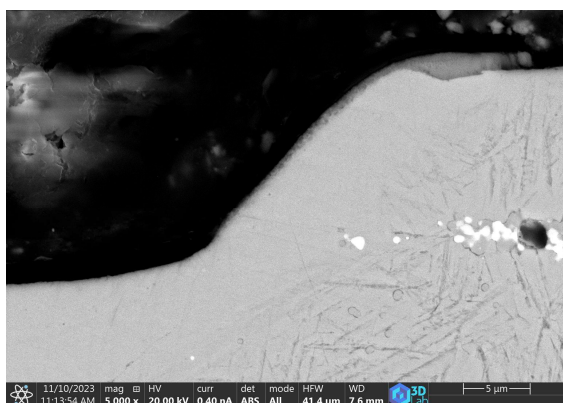
30. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=50$
keresztmetszete



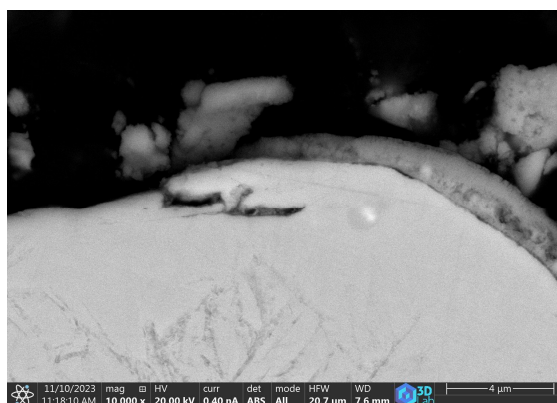
31. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=100$



32. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=100$
keresztmetszete



33. ábra: Hőhatásővezet



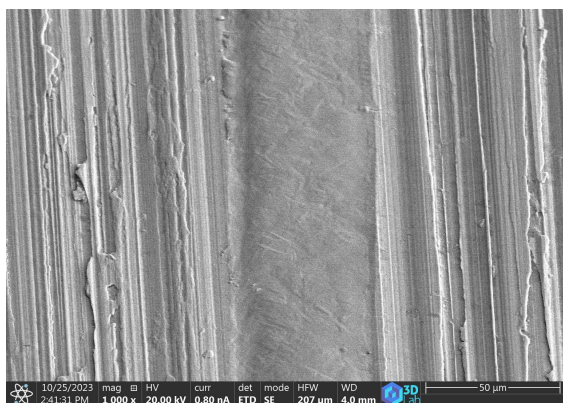
34. ábra: Sérült felület

A minta utolsó harmadában az 50 MHz-re emelt paraméterek találhatók, ezeket a 35. ábra-42. ábra képein foglalom össze. Ezeknél a paramétereknél szinte alig játszik szerepet az abláció, az eltávolított anyag mennyisége elenyésző. A 10 ismétléses paraméternél (35. ábra-36. ábra) csökken a felület érdessége és létrejön egy hőhatásövezet a felület alatt 15 μm mélységben. A 27. ábra és a 28. ábra felvételein látható paraméterhez hasonlóan ebben az esetben is egy felületsimítás történik.

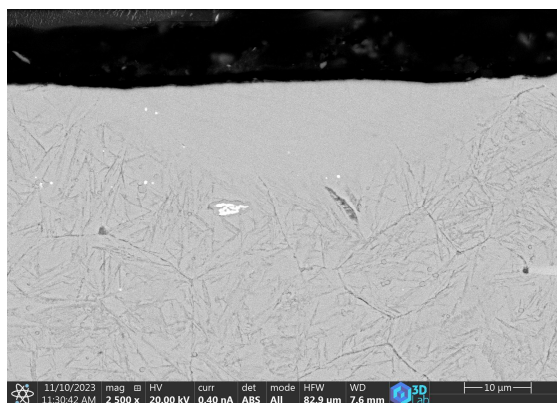
Tovább haladva a paramétereken az 50-es ismétlésnél (37. ábra-38. ábra) egy nem várt jelenséget tapasztaltunk. Anyageltávolítás és árok képződése helyett, anyagfelrakódás következett be (42. ábra). Ennek oka feltehetően az lehetett, hogy az impulzusok hatására az anyag csak melegszik, megolvad, de nem lépi túl nagy mértékben az ötvözetre jellemző likvidusz hőmérsékletet, amelyet így könnyedén tud mozgatni a lézerimpulzusok lökeshulláma, majd a folyamat végén kihűl és újra megszilárdul. Amennyiben ez igaz, akkor a kezelt vonalszakasz kezdeténél anyaghiány valószínűsíthető. Ennek az effektusnak a megfigyelése és megértése további kísérleteket igényel mindazonáltal, hogy a mechanikai tulajdonságokra vonatkozóan a dolgozat készítéséig nem végeztünk vizsgálatokat.

A minta utolsó paramétere az 50 MHz-es frekvencián a 100-as ismétlésszámú kísérlet (39. ábra-40. ábra). A felvételen látható, hogy a „domb” eltűnt, a felület sima és alatta átolvasztott zóna található 10 μm mélységben, amit további 6 μm mélységben hőhatásövezet követ. A felhordott anyagréss eltűnését az ismétlésszámok növeléséből származó hőmérsékletemelkedés okozta abláció okozta. Az abláció jelenlétének ellenére az előző paraméternél jelentkező effektus is jelen van, tehát ennek a vonalszakasznak az bevezető része is kevesebb anyagot tartalmazhat. A mechanikai tulajdonságai ennek a rétegződésnek sem ismertek, de vizsgálata indokolt lehet.

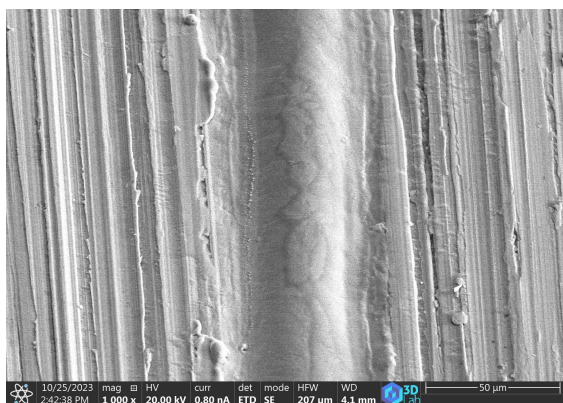
A felvételek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az első közelítésben alkalmazott 60W-os energiaszint olyan folyamatokat eredményez, amelyek nem teszik lehetővé a szabályozott geometriák létrehozását. Ezért a következő lépésben a frekvenciaszinteket változatlanul hagyva a teljesítményt megfelezttem és 30W-os értékre állítottam be és újra elvégzem az elektronmikroszkópos méréseket. A kísérlettervet a 9. táblázatban foglalom össze. A a szoftveres felületen megjelenő és a mintán lévő kezelési nyom elektronmikroszkópos felvételét a 43. ábra és a 44. ábra mutatja be. A megismételt kísérlettől előzetesen azt várom, hogy redukálni tudom a lézeres kezelés okozta mellékhatásokat.



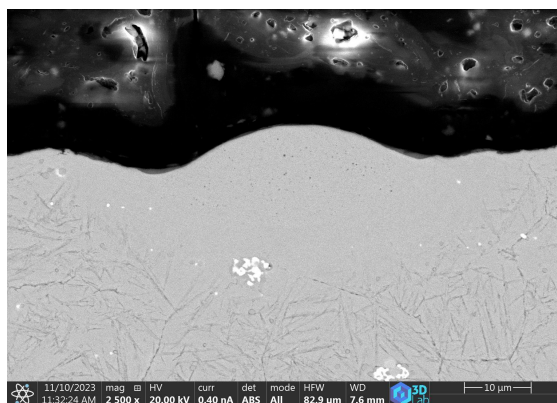
35. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=10$



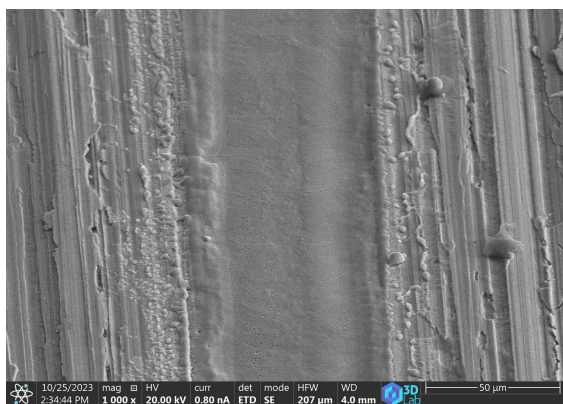
36. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=10$
keresztmetszete



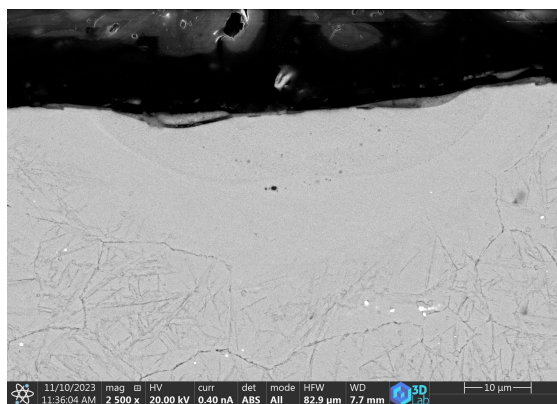
37. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=50$



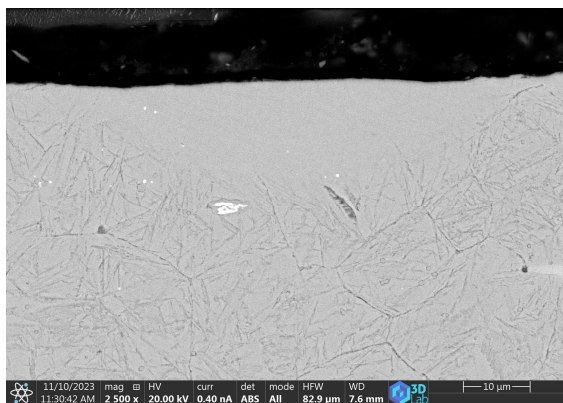
38. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=50$
keresztmetszete



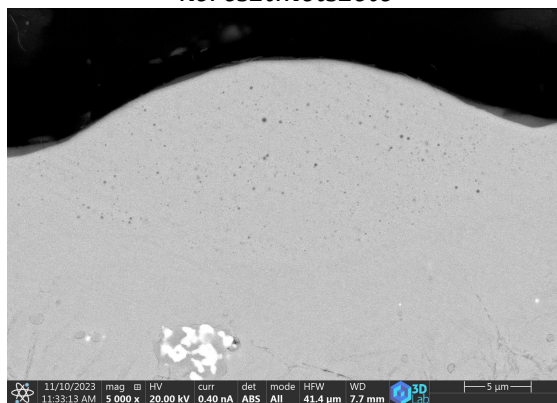
39. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=100$



40. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=100$
keresztmetszete



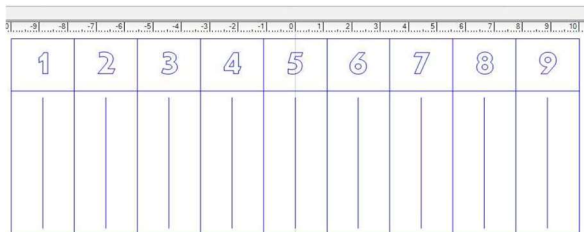
41. ábra: Lecsökkent felületi érdesség



42. ábra: Domb képződése

9. táblázat: A 3. minta kísérletterve, változtatott paraméter: teljesítmény

Rögzített paraméterek:			Pásztázási sebesség (v_m):				1 m/s	
			Teljesítmény (P):				30 W	
Változó paraméterek:			Frekvencia					
			Ismétlések száma					
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
2 MHz	2 MHz	2 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz	50 MHz	50 MHz	50 MHz
10 ism.	50 ism.	100 ism.	10 ism.	50 ism.	100 ism.	10 ism.	50 ism.	100 ism.



43. ábra: 3. minta elrendezése a szoftver grafikus felületén

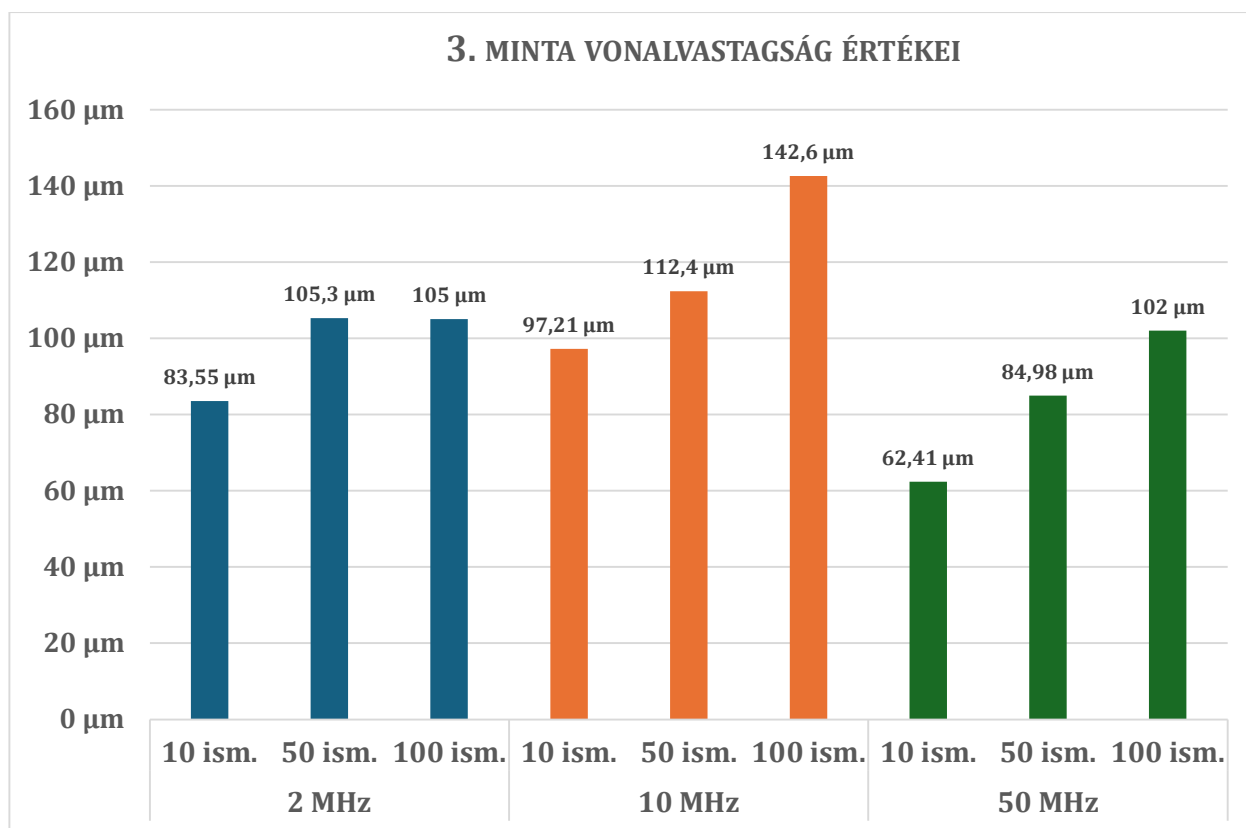


44. ábra: 3. mintán létrehozott kezelések SEM mozaik felvétele

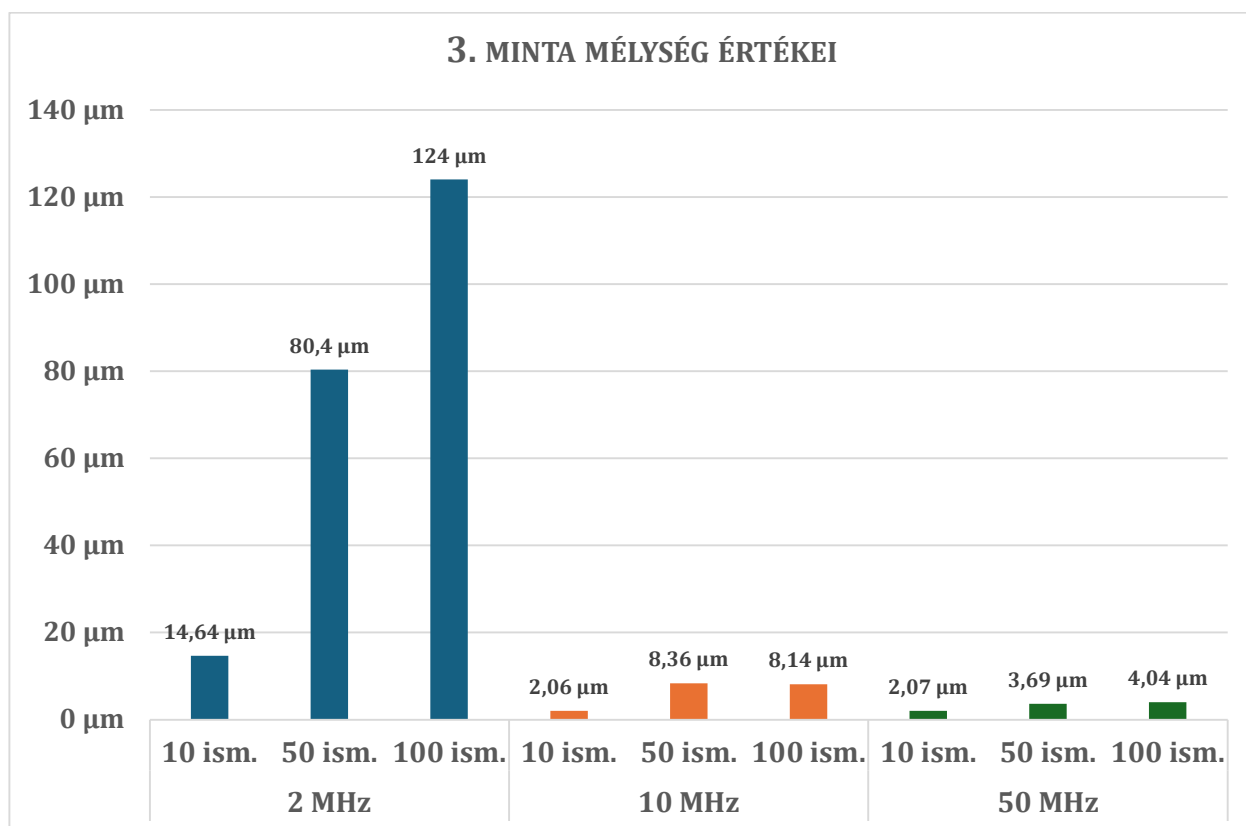
A dolgozat 3. és egyben utolsó vizsgált mintája ugyanarra a sémára épül, mint a megelőző kísérletek próbatestei, így a kiértékelési stratégián sem kellett változtatni. A felület elektronmikroszkópos vizsgálatát követően, amelyet ismét 0° és 45° -os tárgyasztalállások mellett végeztünk el, a keresztmetszeti képek elkészítéséhez megfelelő pozícióban elvágtuk a próbatestet. Ezt követte a négyfokozatú csiszolási és polírozási művelet, végül pedig a 2%-os nitál oldattal történő maratás a szemcsehatárok láthatóvá tétele érdekében. A mérés eredményeit a 10. táblázatban és a 45. ábra, 46. ábra diagramjain foglaltam össze. Az előző mintához hasonlóan, a frekvencia növelésével összhangban változtak a jellemző méretek, emellett előrelépést jelent, hogy a mikrorepedések eltűntek, mert kisebb mértékű hőszokk érte a szerszámacél próbatestet.

10. táblázat: A 3. minta mérési eredményei

3. Minta		Árok szélessége [μm]	Hőhatásövezet [μm]	Hőhatásövezet keménysége [HV0.1]	Árok mélysége [μm]	Repedés [μm]
2 MHz						
1.	10 ism.	83,55	8,05	687	14,64	-
2.	50 ism.	105,3	3,43	659	80,4	-
3.	100 ism.	105	6	637	124	-
10 MHz						
1.	10 ism.	97,21	15,22	707	2,06	-
2.	50 ism.	112,4	14,3	748	8,36	-
3.	100 ism.	142,6	12	744	8,14	-
50 MHz						
1.	10 ism.	62,41	14,08	638	2,07	-
2.	50 ism.	84,98	19,69	793	3,69	-
3.	100 ism.	102	9,2	608	4,04	-



45. ábra: 3. minta vonalvastagság értékei



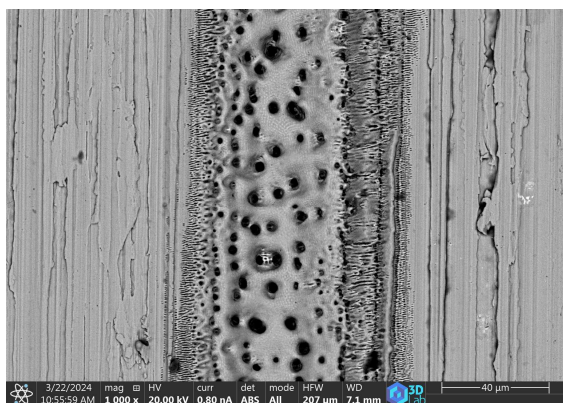
46. ábra: 3. minta mélység értékei

A 2 MHz-es kezelések SEM-felvételeit elemezve (47. ábra-54. ábra) hasonló következtetéseket lehet levonni, mint az előző kísérletnél. A legszabályosabb geometriát az 50-szeres pásztázás adta (50. ábra), de számolni kell ebben az esetben is és a 100-szoros pásztázásnál is (52. ábra) nagy mennyiségű átolvasztott réteggel, amely megszüntetése további teljesítménycsökkentést és stratégiamódosítást igényel. Fontos azonban kihangsúlyozni, hogy a legnagyobb mennyiségű anyagot ezen a frekvenciaszinten lehet eltávolítani, az abláció jelenségének dominanciája miatt.

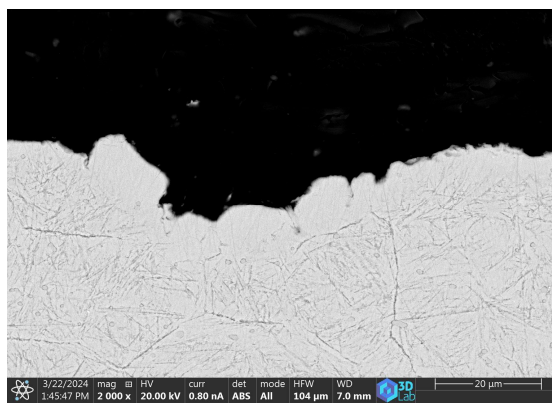
Nagyobb frekvenciára kapcsolva a lézert (55. ábra-62. ábra), a korábban megismert folyamatok mérséklődése tapasztalható. 10 ismétlésnél (56. ábra) egy enyhe felületsimítás történik és 15 μm mélységben változik az anyag szerkezete a lézersugár által keltett hő miatt. Az 50 ismétléssel végzett művelet (30. ábra) során újra megjelent az anyagfelrakódás jelensége. A SEM-felvétel alapján arra lehet következtetni, hogy a lézersugár közel azonos mértékben okozott ablációt és olvasztást, így csak részlegesen töltődött fel az árok. Az ismétlésszámot 100-ra emelve (60. ábra) is hasonló jelenség zajlik le, ahol úgy vélem, hogy nagyobb az eltávolított anyag mennyisége.

A 3. minta 50 MHz-es frekvenciaszintjén (63. ábra-69. ábra) az előző kísérletben (2. minta) tapasztaltakhoz hasonló eredményt értünk el. Kissé „hullámosabb” felületet kaptunk, mivel a kisebb teljesítmény kevesebb anyaggal volt képes feltölteni az árkot. Ezek az eredmények további mélyebb megértést nyújtanak az ablációs folyamatok és a felületi morfológia közötti összefüggésekről. Az árkokban keletkezett hullámosság feltehetően összefügg az ablációs hatékonysággal és az anyagfelhordás mennyiségével, ami fontos szempont lehet a további paraméteroptimalizáció során.

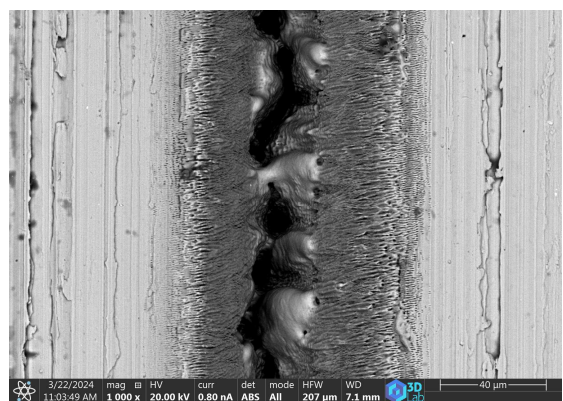
A microvickers keménységmérést a 3. mintán is elvégeztük. A mérések kiértékelésekor azt tapasztaltuk a SEM-felvételekkel összhangban, hogy továbbra is jelen van a hőhatásövezet minden vizsgált paraméter esetében, de a kilágyulás mértéke nem volt olyan mértékű (10. táblázat), mint amikor maximális teljesítményszinten kezeltük a mintát. Ez arra utalhat, hogy a lézerteljesítmény csökkentése és a kilágyulás mértékének kontrollálása segíthet minimalizálni a hőhatásövezet káros hatásait anélkül, hogy jelentősen befolyásolná az anyag keménységét.



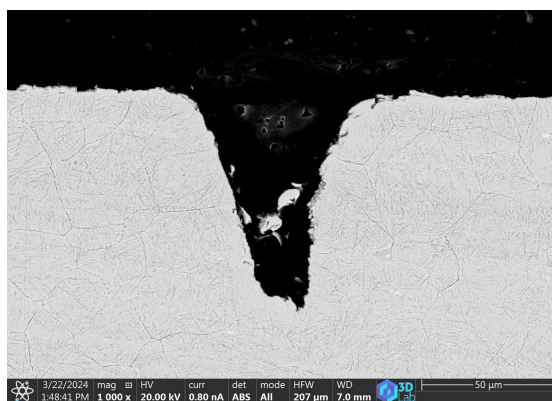
47. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=10$



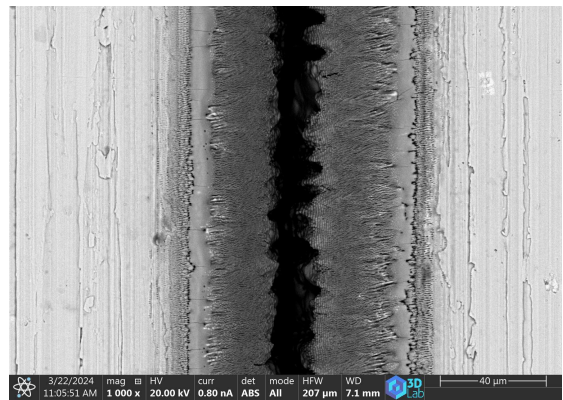
48. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=10$
keresztmetszete



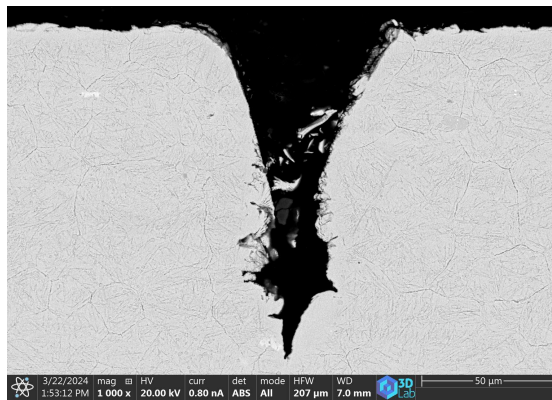
49. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=50$



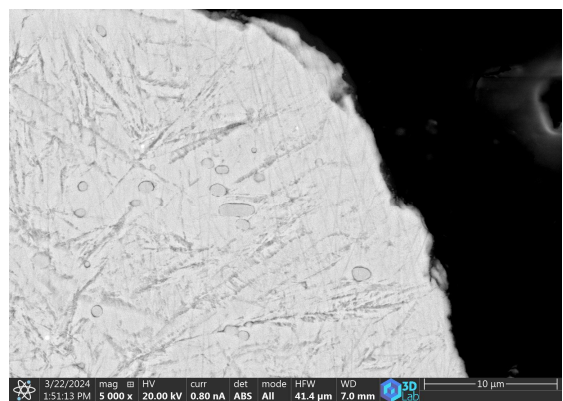
50. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=50$
keresztmetszete



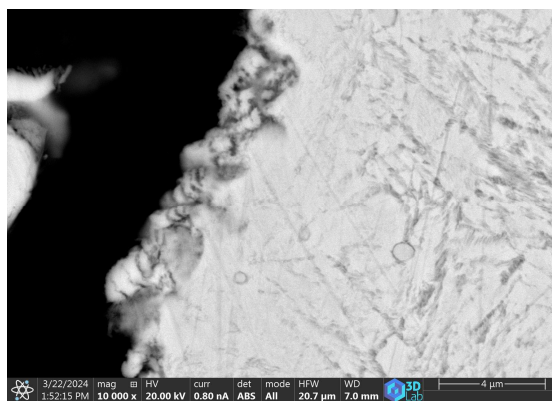
51. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=100$



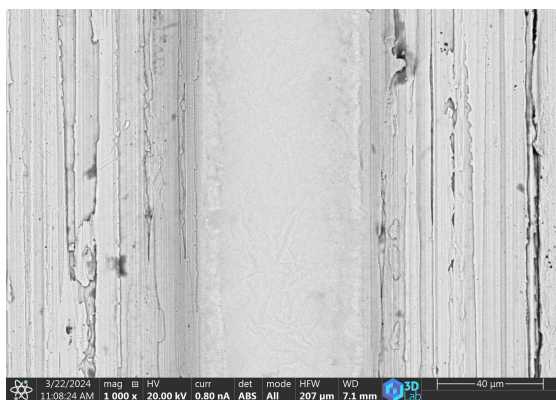
52. ábra: $f=2$ MHz, $ism.=100$
keresztmetszete



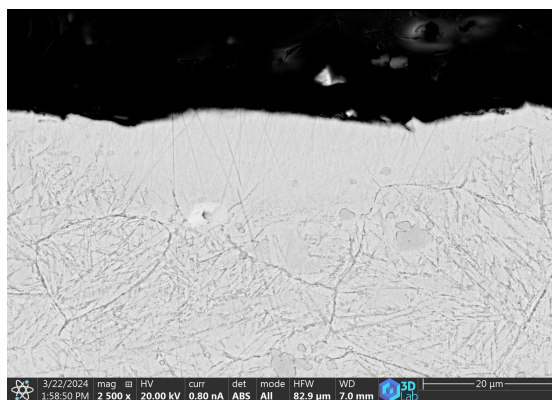
53. ábra: Hőhatásövezet



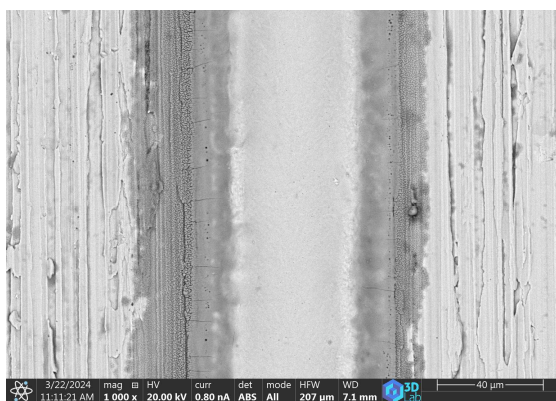
54. ábra: Átolvasztott réteg



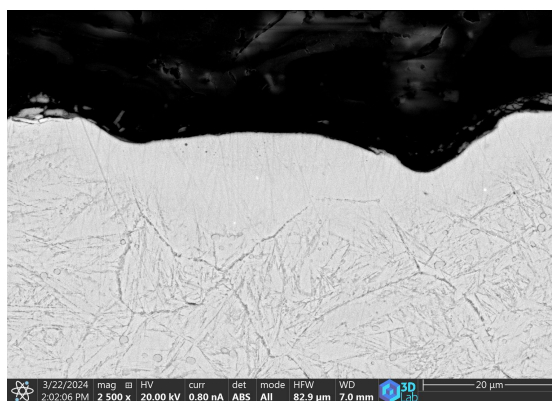
55. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=10$



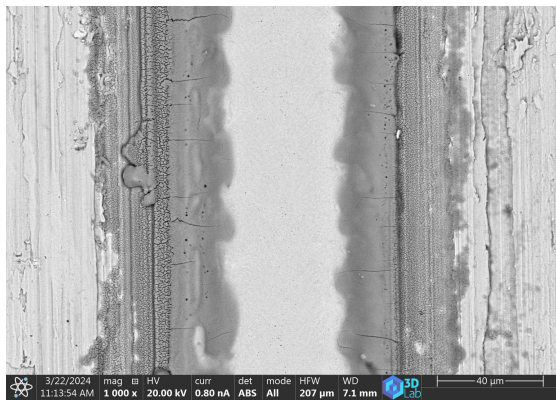
56. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=10$
keresztmetszete



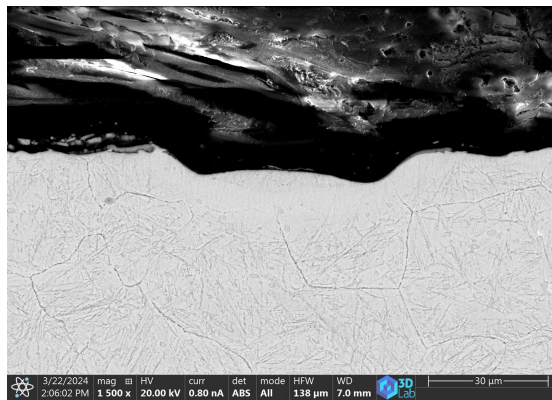
57. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=50$



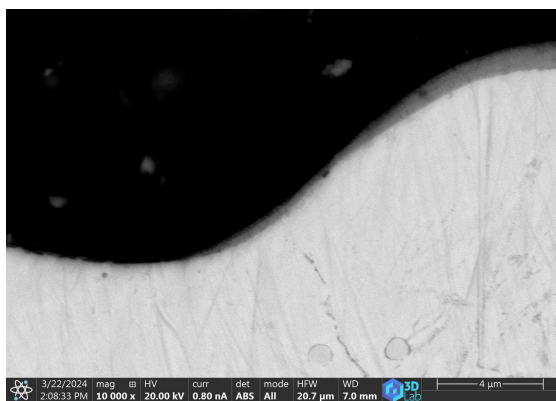
58. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=50$
keresztmetszete



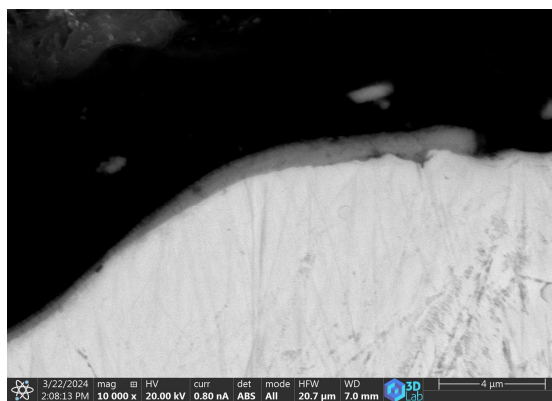
59. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=100$



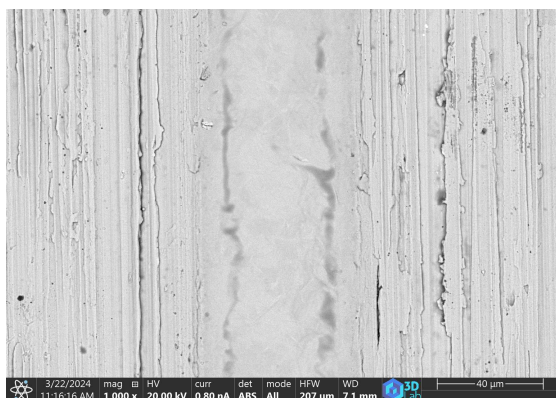
60. ábra: $f=10$ MHz, $ism.=100$
keresztmetszete



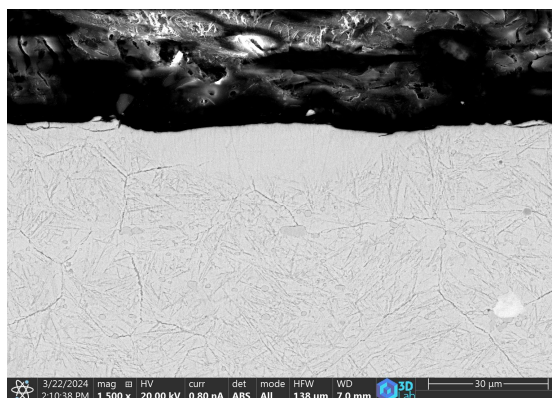
61. ábra: Hőhatásövezet



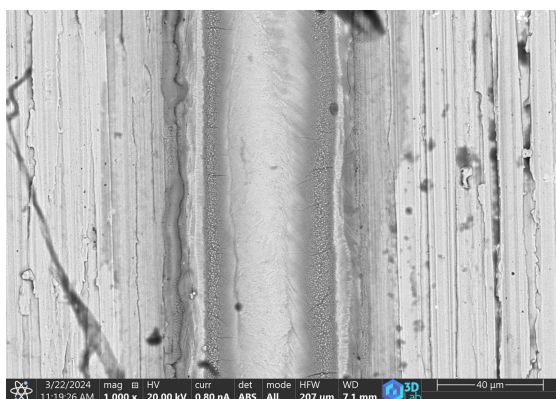
62. ábra: Átolvastott réteg



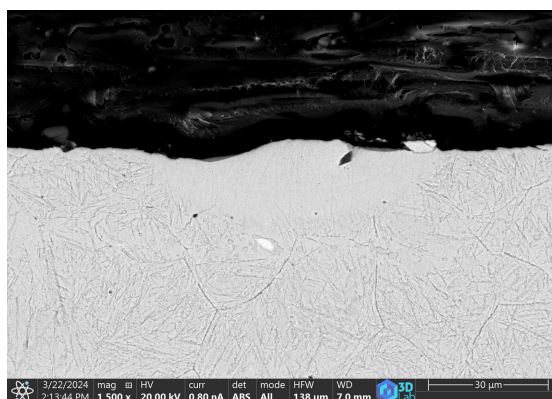
63. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=10$



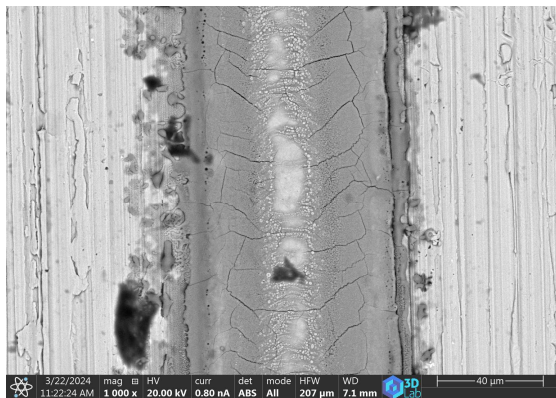
64. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=10$
keresztmetszete



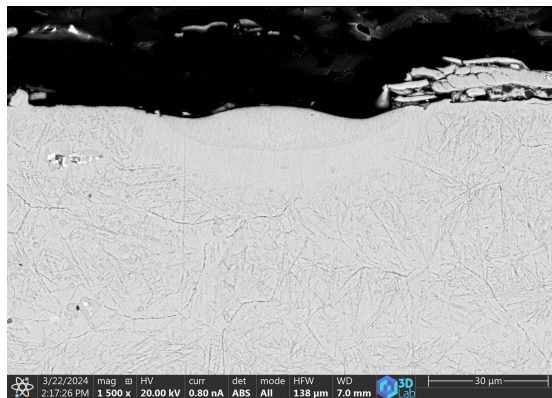
65. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=50$



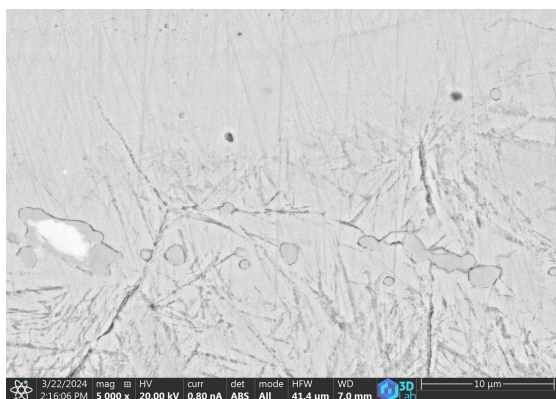
66. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=50$
keresztmetszete



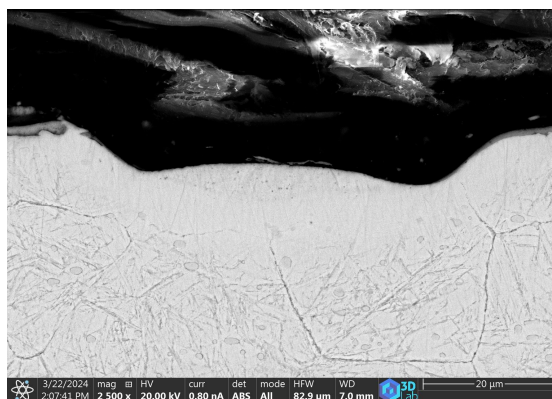
67. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=100$



68. ábra: $f=50$ MHz, $ism.=100$
keresztmetszete



69. ábra: Hőhatásövezet



70. ábra: Árok helyett domb képződése

5. Konklúzió, eredmények összefoglalása

A dolgozatomban azt a célt tűztem ki, hogy ultrarövid impulzusú technológiával anyageltávolítást végzek szerszámacél felületén annak érdekében, hogy a közeljövőben szabályos felületi mintázatot alakítok ki, amely növeli a szerszámanyag felületének súrlódási tényezőjét. A megnövelt súrlódási együttható nagy előrelépést jelenthet a Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karának Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének kutatási munkájában.

A kísérletek és az azt követő mérések során több jelenséget is sikerült megismerni és határozottan elkülöníteni egymástól. A kísérletsorozat elején a femtoszekundumos lézertechnológia révén periodikus felületi struktúrákat állítottam elő, amelynek a geometriai jellemzői a nano-tartományba esnek, jelentős hatással vannak a felületi tulajdonságokra úgy, hogy nem távolítunk el számottevő anyagmennyiséget.

A kísérlet folytatásaként felvettem a változó paraméterek közé a frekvenciát és a lézerszkennelési ismétlésszámot. Első körben a *Coherent Monaco 1035-60-80* sugárforrással elérhető maximális teljesítményszinten dolgoztam, ami 60 W-ot jelent. A vizsgálatokat 2, 10, 50 MHz frekvenciákon, 10, 50, 100 ismétlések mellett végeztem és az elektronmikroszkópos kiértékeléseim során arra a következtetésre jutottam, hogy a frekvencia növelésével megváltozik a lézer-anyag kölcsönhatás. Míg 2 MHz-en jellemzően az abláció dominál az anyag megolvadásával szemben, addig a magasabb frekvenciaszinteken kiegyenlítődni látszik és meg is fordul ez az arány. Ez annak köszönhető, hogy a frekvencia növelésével csökken a kicsatolható energia, ami nem elegendő az anyag közvetlenül plazmaállapotba juttatásához, csupán annak megolvasztására alkalmas.

A szabályozott geometriák elérésére további kísérletek szükségesek. Az elektronmikroszkópos felvételek arról tanúskodnak, hogy a lézeres kezelés során több olyan nem kívánatos jelenség is történik, mint pl. a mikrorepedések, átolvasztott rétegek, hőhatásövezetek, amik károsak a végeredmény szempontjából. Egy lehetséges megoldás, amelyre a dolgozatom is rávilágít, hogy a teljesítmény csökkentésével elkerülhetőek a fentebb említett mellékhatások. A mikrokeménységmérések során a hőhatásövezetben kisebb mértékű lágyulás következett be, amely további paraméteroptymalizációval csökkenthető. Előrelépési lehetőséget jelenthet még a teljesítménycsökkentés mellett a kombinált frekvenciák alkalmazása, ha a kisebb frekvenciákra nagyoló, míg a nagyobbakra simító műveletként tekintünk, valamint az ismétlések finomhangolása is kedvezőbb irányba mozdíthatja a kísérletsorozatot.

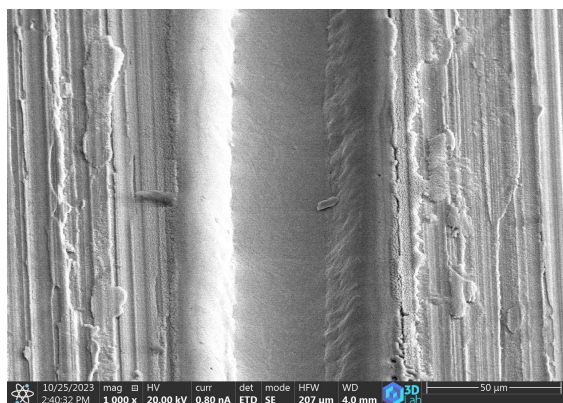
A kutatás során megvizsgáltam különböző paraméteregyütteseket, amik eltérő eredményeket hoztak. A következő szempontok alapján kiválasztottam a legjobb kombinációt a további kísérletekhez:

- A lézeres kezelés során történjen anyageltávolítás, az abláció jelensége domináljon.
- A keletkezett geometria legyen független a mintavétel helyétől.
- A lézersugárzás ne járjon káros mellékhatásokkal:
 - mikrorepedések jelenléte,
 - nagyfokú átolvasztás,
 - kiterjedt hőhatásövezet,
 - keménységcsökkenés a hőhatásövezetben.

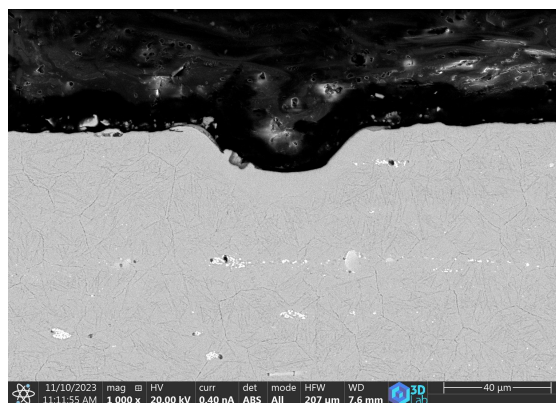
Ezen szempontok alapján a választott paraméteregyüttest amely alkalmas a további felületi mintázat kialakítására a 11. táblázatban foglalom össze és a 71. ábra, 72. ábra képein mutatom be.

11. táblázat: A kísérletek során optimálisnak ítélt lézersugaras kezelés paraméterei

Frekvencia:	10 MHz
Teljesítmény:	60W
Impulzus hossza:	277 fs
Besugárzott energia:	6 μ J
Pásztázási sebesség:	1 m/s
Pásztázások száma:	50



71. ábra: $f = 10$ MHz, $ism. = 50$



72. ábra: $f = 10$ MHz, $ism. = 50$
keresztmetszete

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, akik nemcsak szakmai tudásukkal, de támogató hozzáállásukkal is hozzájárultak ahhoz, hogy kutatómunkám elérje jelenlegi színvonalát. Köszönetemet fejezem ki a Miskolci Egyetem Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karának, hogy lehetőséget biztosítottak arra, hogy bekapcsolódjak az intézményi kutatómunkába és bármikor készségesen álltak rendelkezésemre, amikor szükségem volt rá.

A kutatómunkát az OTKA K143800 számú „Tömbi és kompozit nanoszerkezetű fémek előállításának új módjai, kísérletek, jellemzés és modellezés” című projekt is támogatta.

7. Irodalomjegyzék

- [1] R. Poprawe, K. Boucke, and D. Hoffman, 'Tailored Light 1', 2018, doi: 10.1007/978-3-642-01234-1.
- [2] J. Meijer *et al.*, 'Laser Machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons', *CIRP Annals*, vol. 51, no. 2, pp. 531–550, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61699-0.
- [3] A. H. Hamad, 'Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution', in *High Energy and Short Pulse Lasers*, InTech, 2016. doi: 10.5772/63892.
- [4] K. Sugioka, 'Hybrid femtosecond laser three-dimensional micro-and nanoprocessing: a review', *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 1, no. 1, p. 012003, Apr. 2019, doi: 10.1088/2631-7990/ab0eda.
- [5] D. P. Wan, J. Wang, and P. Mathew, 'ENERGY DEPOSITION AND NON-THERMAL ABLATION IN FEMTOSECOND LASER GROOVING OF SILICON', *Machining Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 263–283, Jul. 2011, doi: 10.1080/10910344.2011.595324.
- [6] M. Anderson *et al.*, 'Surface and microstructure investigation of picosecond versus femtosecond laser pulse processed copper', *Surf Coat Technol*, vol. 409, p. 126872, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2021.126872.
- [7] Y. Lu *et al.*, 'Femtosecond Laser Fabrication of Microchannels in Transparent Hard Materials', *Adv Mater Technol*, vol. 8, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.1002/admt.202300015.
- [8] R. Goodarzi, F. Hajiesmaeilbaigi, and E. Bostandoost, 'Self-organized fractal-like structures formation on the silicon wafer surface using the femtosecond laser pulses', *Opt Lasers Eng*, vol. 128, p. 106008, May 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106008.
- [9] U. Pettersson, 'Surfaces Designed for High and Low Friction', Department of Engineering Sciences, 2005.
- [10] B. Bhushan, 'Introduction to Tribology, 2nd Edition | Wiley', 2002, Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-gb/Introduction+to+Tribology%2C+2nd+Edition-p-9781119944539>

- [11] D. Zhu *et al.*, 'Fabrication and applications of surface micro/nanostructures by femtosecond laser', *Colloid Interface Sci Commun*, vol. 59, p. 100770, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.COLCOM.2024.100770.
- [12] T. Sugihara and T. Enomoto, 'Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: A comparative study of different texture patterns', *Precis Eng*, vol. 49, pp. 52–60, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.009.
- [13] A. Voznesenskaya, D. Kochuev, and A. Zhdanov, 'Research on the tribological properties of periodic micro- and nanostructures on the molybdenum surface obtained as a result of laser action', *Mater Today Proc*, vol. 19, pp. 2037–2040, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.069.
- [14] 'Dr. Smóling Kálmán: Szerszámacélok kézikönyve (Szabványkiadó, 1985) - antikvarium.hu'. Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.antikvarium.hu/konyv/dr-smoling-kalman-szerszamacelok-kezikonyve-253492>
- [15] ScanLab GmbH, 'Installation and Operation for Real Time Control of Scan Heads and Lasers', Siemensstr. 2a 82178 Puchheim Germany.