

SOLTI KÁLMÁN
DIPLOMATERV

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLOGIA TANSZÉK



DIPLOMATERV

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLOGIA TANSZÉK

SOLTI KÁLMÁN
DIPLOMATERV

Acélok additív gyártástechnológia paramétereinek meghatározása és additívan gyártott melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságának vizsgálata

Konzulens:

Nemesházy György
Fejlesztőmérnök
Pammer Dávid
Egészségügyi mérnök

Témavezető:

Dr. Kovács Dorina
Adjunktus

Budapest, 2021



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Anyagtudomány és Technológia Tanszék

<http://www.att.bme.hu/>

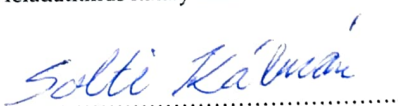
DIPLOMAMUNKA-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Solti Kálmán		Azonosító: 78083734510	
	Képzéskód:	2N-MG0	Specializáció kódja: 2N-MG0-AT	Feladatkiírás azonosítója:
	Szak: Gépészmérnöki mesterképzési szak	GEMT:2022-1:2N-MG0:HGOBT1		
	Diplomamunka-feladatot kiadó tanszék: Anyagtudomány és Technológia Tanszék		Zárvizsgát szervező tanszék: Anyagtudomány és Technológia Tanszék	
	Témavezető: Dr. Kovács Dorina, adjunktus és Dr. Biró István, adjunktus			

FELADAT	Cím	Acélok additív gyártástechnológia paramétereinek meghatározása és additívan gyártott melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságának vizsgálata Determination of additiv manufacturing process parameters of steels and machinability study of tool steel
	Részletes feladatok	1. A fémek additív gyártásához kapcsolódó szakirodalmi források felmérése és elemzése 2. Melegalakító acél nyomtathatóságának vizsgálata; technológiai paraméterek meghatározása az elvárt geometriai pontosság eléréséhez. 3. Additívan gyártott melegalakító szerszámacél mintadarab anyagvizsgálata: csiszolatkészítés, keménységmérés, szövetszerkezet analízis, elektronmikorszkópos vizsgálat 4. Additívan gyártott melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságának vizsgálata: erőmérés és felületi érdesség mérés 5. Összehasonlító diagramok készítése, eredmények kiértékelése. Javaslattétel további kísérletek elvégzéséhez. 6. A diplomamunka feltételeinek megfelelő írott műben foglalja össze az eredményeit és azoknak átfogó értékelését.
	Hely	A diplomamunka készítés helye: Csepeli Szerszámgépgyár Kft. 1211 Budapest, Építőüzem utca 3. Konzulens: Nemesházy György, fejlesztőmérnök

ZÁRÓVIZSGA	1. záróvizsga tantárgy(csoport)	2. záróvizsga tantárgy(csoport)	3. záróvizsga tantárgy(csoport)
	ZVEGEMTNGAT Anyagtudomány	ZVEGEMTNGKA Károsodás	ZVEGEMTNGAL Alakítás

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2021. szeptember 6.		Beadási határidő: 2021. december 10.	
	Összeállította: Dr. Kovács Dorina és Dr. Biró István témavezető		Ellenőrizte: Dr. Májlínger Kornél s.k. tanszékvezető	Jóváhagyta: Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Szakdolgozat-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan.  Solti Kálmán			

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen diplomaterv az üzem/intézmény által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Budapest, 2021.12.10.

Az üzem részéről: Nemesházy György

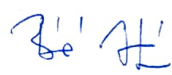


üzemi konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2021.12.10.



témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Solti Kálmán* (HGOBTI), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2021.12.10.



szigorló hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	ix
Jelölések jegyzéke	x
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Additív technológiák áttekintése.....	3
2.2. Lézersugárral történő bevonatolás.....	5
2.2.1. Lézersugaras bevonatolásról általánosságban	5
2.2.2. Lézersugaras bevonatolás paraméterei	7
2.2.2.1. Lézersugár teljesítménye	8
2.2.2.2. Pásztázási sebesség.....	10
2.2.2.3. Lézersugár átmérő és átfedési arány.....	11
2.2.3. Lézersugárral történő bevonatolás előnyei és hátrányai	11
2.2.4. Lézersugaras bevonatolt anyagok mikrostruktúrája.....	13
2.3. Esettanulmányok	15
2.3.1. H13-as szerszámacél.....	15
2.3.2. 15-5PH korrózióálló acél.....	23
2.4. Alkalmazott additív technológia	30
2.5. LRS EVO Diodeline	31
3. Technológiai paraméterek meghatározása	33
3.1. Additív gyártási technológia esetén.....	33
3.1.1. Kísérleti terv felállítása.....	33
3.1.2. Mintadarabok gyártása szövetszerkezet analízis elvégzéséhez	35
3.1.3. Próbagyártások eredményei additív technológiai paraméterek optimalizáláshoz.....	36
3.1.3.1. Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál.....	36
3.1.3.2. Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál.....	37
3.1.3.3. Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál	38
3.1.3.4. Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál.....	39

3.1.3.5. Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál	40
3.1.3.6. Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál	41
3.1.3.7. Lézersugár teljesítménye – Átfedés nagysága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál	42
3.1.4. Anyagvizsgálatok eredményei	42
3.2. Forgácsolás esetén.....	56
3.2.1. Kísérleti terv forgácsoló erő méréshez.....	56
3.2.2. Előkészítés a mérésekre	58
3.2.3. Forgácsolási erők mérése	61
3.2.4. Mérési eredmények kiértékelése	62
3.2.4.1. Erőmérés során meghatározott adatok kiértékelése.....	62
3.2.4.2. Felületi érdesség mérése és a forgácsolt felület elemzése.....	72
3.2.4.3. Mikrokeménység mérés a forgácsolt felületeken.....	79
4. Összefoglalás/Eredmények értékelése.....	81
4.1. Additív technológia esetén.....	81
4.2. Forgácsolhatósági vizsgálatok eredményei	82
4.3. Javaslatok/Következtetések/Tanulságok	83
5. Idézett forrásmunkák.....	84
6. Summary.....	86
7. Mellékletek	87
7.1. Melléklet: 15-5PH korrózióálló acél adatlapja	87
7.2. Melléklet: AISI H13 megalakítószerszám acél adatlapja	89
7.3. Melléklet: Forgácsoló erő mérése során használt váltólapka és szerszámtest adatlapja	91
7.4. Melléklet: Kívánt méretpontosság megállapításához használt additív technológiai paraméterek AISI szerinti H13-as megalakító szerszámacél esetében.	93
7.5. Melléklet: Szövetszerkezet vizsgálatához lézersugaras bevonatolással gyártott AISI H13-as mintadarabok additív technológiai paraméterei.	97
7.6. Melléklet: Kívánt méretpontosság megállapításához használt additív technológiai paraméterek 15-5PH korrózióálló acél esetében.	100
7.7. Melléklet: Additív technológiai próbagyártások során elért próbatest magasságok	102
7.8. Melléklet: Forgácsolóerő méréséhez gyártott próbatestek geometriai méretei	105
7.9. Melléklet: Forgácsolt felület felületiérdség mérésének eredményei.....	106

7.10. Melléklet: Keménység mérés eredményei.....	109
7.11. Melléklet: Keménységmérés eredményei grafikusan ábrázolva	112
7.12. Melléklet: Forgácsolt felületekről készített mikroszkópos felvételek	117
7.13. Melléklet: Mért forgácsoló erő komponensek grafikonon ábrázolva	126
7.14. Melléklet: A mért forgácsoló erők és az ismétlő mérések grafikonon ábrázolva	131
7.15. Melléklet: A mért forgácsoló erők és a számolt forgácsoló erők grafikonon ábrázolva.....	134
7.16. Melléklet: Erőarányok grafikonon történő ábrázolása	139
7.17. Melléklet: Forgácsolási folyamatok – GY1 laborgyakorlat útmutató.....	143

ELŐSZÓ

Az alábbi diplomateremben a Csepeli Szerszámgyépgyár által számomra felajánlott feladat végre hajtását fogom részeltessen közölni az olvasóval. Csepel a szerszámgyépgyártás e diplomaterve megírásakor már majd nem százéves múltat tekint vissza. A cég a szerszámgyépgyártás hagyományát kívánja tovább vinni, mindezt a napjaink igényeire szabva a legmodernebb technológia felhasználásával. Egy pályázat keretein belül a szerszámgyépgyár további cégekkel közösen együtt működve megtervez egy gyártó cellát, mely egy lézersugaras hegesztő berendezésből, egy hat tengely mentén vezérelhető robotkarból és egy öttengelyes megmunkáló központból áll. A feladatom egy minta alkatrész és a hozzá szükséges készülék tervezése és a különböző gyártási technológiák meghatározása volt. Itt ki hangsúlyoznám, hogy a hegesztő berendezés képes lézersugaras bevonatolásra, másképp fogalmazva képes egy fajta additív technológiával különböző egyszerű alkatrészeket előállítani. Diplomatervem fő csapás vonalaként ezen additív technológia vizsgálatát kívánom megjelölni, remélve, hogy az itt meghatározott technológiai paraméterek és megfigyelések a jövő mérnöktársadalmának a hasznára válhat.

* * *

Köszönetet szeretnék mondani a Csepeli Szerszámgyépgyár Kft.-nek, hogy lehetővé tették a megfelelő eszközök és infrastruktúra biztosításával a diplomatervem létrejöttét. Köszönöm a Szerszámgyépgyár minden dolgozójának a hathatós segítséget, melyet a diplomatervem készítése során nyújtottak. Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia, illetve Gyártástudomány és Technológia Tanszékeinek, hogy biztosították az eszközöket melyekkel a diplomatervem során a szükséges méréseket elvégezhettem. Köszönöm a szakmai segítséget Pammer Dávidnak az Anyagtudomány és Technológia Tanszék meghívott oktatójának, Renkó Józsefnek az Anyagtudomány és Technológia Tanszék doktoranduszának Dr. Nagy Attilának a Wigner Jenő Fizikai kutatóintézet munkatársának és külön köszönöm a segítségét Dr. Biró Istvánnak a Gyártástudomány és Technológia Tanszék adjunktusának és a Tudományos Diákköri Konferenciára készült dolgozatom témavezetőjének.

Budapest, 2021

Solti Kálmán

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_e	fogásszélesség	mm
a_p	fogásmélység	mm
b	forgácsszélesség	mm
d	lézersugár átmérő	mm
E	energiasűrűség	J/mm ²
f	frekvencia	Hz
F_c	forgácsoló erő	N
F_n	normál erő	N
F_p	passzív erő	N
f_z	fogankénti előtolás	mm/ford
h	forgácsvastagság	mm
$k_{c1.1}$	fajlagos forgácsoló erő	N/mm ²
LD	vonalak közti távolság – Line distance	mm
LH	rétegvastagság – Layer Height	mm
m_c	forgácsvastagság hatványkitevője	1
P	lézersugár teljesítmény	W
t	idő	sec
T	periódus idő	sec
v	pásztázási sebesség	mm/s
v_c	forgácsolási sebesség	mm/min

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
φ	szög helyzet	deg
$\Delta\varphi$	szögelfordulás	deg
$\Delta\vartheta$	kompenzációs szög	deg

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
i	általános futóindex (egész szám)
nom	névleges (nominális) érték
opt	legkedvezőbb (optimális) érték
max	maximális érték
min	minimális érték

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

Jelen Diplomamunka célja egy, a Csepeli Szerszámgépgyár által a dolgozat írásakor még építés alatt álló gyártó cella additív technológiai folyamatparamétereinek és forgácsolás technológiai paramétereinek meghatározása és optimalizálása korrózióálló acél és melegalakító szerszámacél esetében. Melyek rendre a következők:

- lézer teljesítménye
- lézersugár átmérője a fókuszpontban
- a lézersugárral felvitt egy réteg vastagsága
- átfedésirány nagysága
- pásztázási sebesség

Ezen cél teljesítésének az érdekében az additív gyártás területén a rendelkezésre álló hazai és nemzetközi szakirodalom kutatása, tanulmányozása és megfelelő következtetések levonása. Kísérleti terv összeállítása az additív technológiai paraméterek meghatározására. A szükséges próbagyártások elvégzése. A meghatározott paraméterekkel megfelelő próbatestek gyártása, melyeken a forgácsolás közben ébredők erők mérése elvégezhető. A forgácsoló erők mérése, a mért adatok kiértékelése a rendelkezésre álló programmal és a megfelelő következtetések levonása. A forgácsolt felületen a keménység és felületi érdesség mérése. Szövetszerkezet analízishez mintadarabok elkészítése. A mintadarabokból csiszolatok, majd azok felületéről mikroszkópi felvételek készítése és elemzése. Végül a Csepeli Szerszámgépgyár számára additív technológiai paraméterek ajánlása az adott fémporokhoz.

1.2. Áttekintés

Jelen dolgozatban áttekintettem a hazai és nemzetközi szakirodalmat, átfogó képet adva az additív gyártási technológiákról, röviden bemutatva azok típusait. Ezután részletesen bemutattam a Csepeli Szerszámgépgyárban rendelkezésre álló lézersugaras hegesztő berendezés által alkalmazott additív technológiát. Ezen technológia folyamat-paramétereit és azok hatását, a technológia előnyeit és hátrányait, valamint a technológiával gyártott darabokra jellemző szövetszerkezetet. Majd a nemzetközi szakirodalomban megjelent cikkeket elemeztem, melyek az általam alkalmazott additív technológia – lézersugaras bevonatolás, angolul „laser cladding” vagy „laser metal deposition” – témakörében íródtak és az általam használt kétféle fémpor (melegalakító szerszámacél és korrózióálló acél) egyikét vizsgálták az adott cikkek szerzői.

Elkészítettem a szükséges kísérlet / mérés terveket, melyekkel a használt fémpor additív technológiai paraméterek meghatározása, illetve a berendezésen adott fémporból gyártott darabok forgácsolása közben fellépő erők mérése volt a célom.

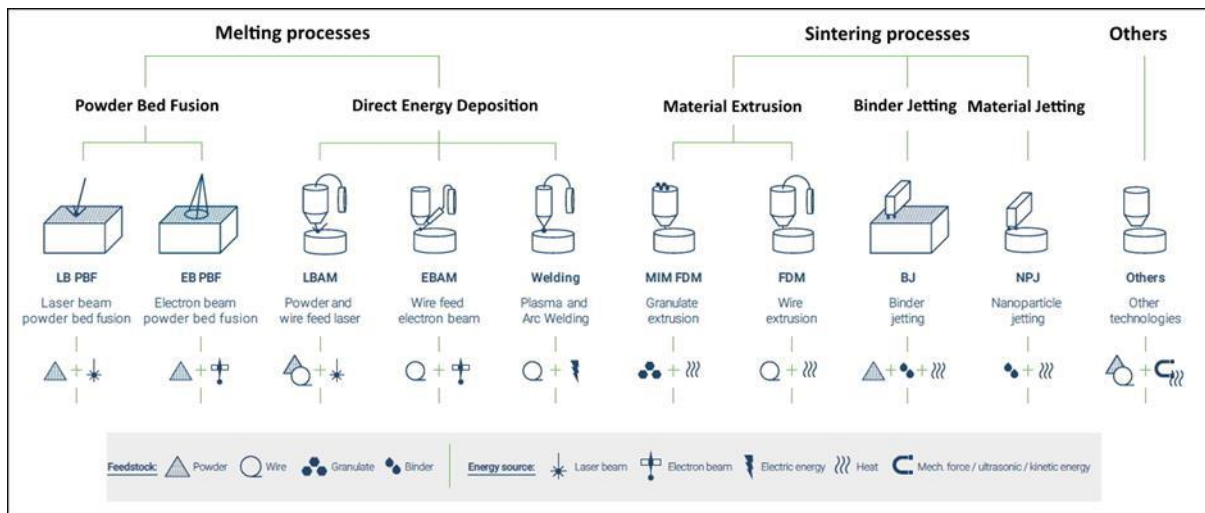
A lézersugaras hegesztő berendezéssel legyártottam a szükséges próbatesteket és meghatároztam a rendelkezésre álló fémporokhoz a szükséges additív technológiai paramétereket. A berendezéssel gyártottam megfelelő mintadarabokat, melyekből csiszolatokat készítettem. A csiszolatokról, a megfelelő polírozás és maratás után, mikroszkópi felvételeket készítettem és ezen felvételeket elemeztem.

A melegalakító szerszámacél fémport felhasználva a forgácsoló erők mérése céljából próbatesteket gyártottam. Ezeken a próbatesteken elvégeztem a szükséges forgácsolás közben fellépő erők mérését. A mért adatokat a rendelkezésre álló programmal és a megfelelő segédletek alapján kiértékeltem. A forgácsolt felületeken megmértem a felületi érdességet és keménységet.

Végezetül pedig összefoglaltam a vizsgálataim során kapott eredményeket. Ajánlást tettem az adott fémporokhoz alkalmazandó additív technológiai paraméterekre és a gyártás további optimalizálására.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Additív technológiák áttekintése



1. Ábra: Additív gyártási technológiák csoportosítása [1]

„Az additív technológiai eljárások száma évről évre növekszik. Jelenleg 18 félélt tartanak számon és számtalan elnevezés vagy márkanév alatt futnak, amelyeket célszerű rendszerezni a jobb áttekinthetőség érdekében. Az 1. ábra a technika jelen állása szerinti eljárásváltozatokat mutatja be a kötést létrehozó alapfolyamatok szerinti csoportosításban, feltüntetve az elnevezés alatt az alapanyagfajtát és az alkalmazott energiaforrást is. Ebben a rendszerezésben az eljárások két nagy főcsoportba, az olvasztásos eljárásokra (melting processes) és a szinterezéses eljárásokra (sintering processes) tagozódnak, amit kiegészít egy harmadik egyéb kategória.” [1]

„Az olvasztásos eljárásoknak két csoportja van: a porágyolvasztásos PBF (Powder Bed Fusion) és a koncentrált energiával végrehajtott anyaglerakás DED (Direct Energy Deposition) eljárásváltozatok.” [1]

„A lézersugaras porágyolvasztást LB-PBF (Laser Beam Powder Bed Fusion). A lézersugaras porágyolvasztásos (LB-PBF) eljárásnál egy pár galvanométer tükör kombinált forgatásával mozgatják a nagy energiasűrűségű lézernyalábot az építési platformon terített fém porágyon. Az eljárás változatoknál a 100 - 1000 W teljesítményű lézersugár rétegről rétegre építi fel a munkadarabot az építési alapra, amelyet fokozatosan rétegenként süllyesztenek le. A rétegek vastagsága 20–100 µm közötti. További eljárásváltozatok: lézersugaras olvasztás (LBM- Laser Beam Melting), szelektív lézer szinterezés (SLM- Selective Laser Melting), lézersugaras fémolvasztás (LMF-Laser Metal Fusion), közvetlen fém additív gyártásnak (DMP-Direct Metal Printing). A porágyolvasztásos eljárások elektronsugaras változata, az EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion) technológia szintén fémporral dolgozik, itt viszont egy nagyenergiájú pásztázó elektronnaláb segítségével készülnek el a rétegek egy vákuumkamrában.” [1]

„A lézersugaras additív gyártás eljárásváltozatokban a lézersugár fókuszfoltjába juttatott por vagy huzal megolvasztása által lerakott varratokból készül el rétegenként a darab. Az eljárásváltozatok közül van olyan, ahol egyidejűleg különböző összetételű porokkal is kivitelezhető a gyártás, ami lehetőséget kínál a felület tulajdonságainak folyamatos megváltoztatására.” [1]

„Eljárás változatok: LMD (Laser Metal Deposition); LENS (Laser Engineering Net Shape); Laser Cladding, Laser Generation; LBMD (Laser-Based Metal Deposition) LFF (Laser Freeform Fabrication); Laser Direct Casting; Laser Cast, Laser Consolidation, LasForm neveken ismert eljárásokat is ebbe a csoportba sorolják. Ezen eljárásváltozatoknál egy vagy több fúvókán keresztül a fémpor automatizálva a nyomtató fejen, vagy külön adagolón kerül bevezetésre, és ezt a lézersugár vékony rétegben megolvasztva hernyóvarratot képez, amelyeket megfelelő átfedéssel raknak egymás mellé, így rétegről rétegre építve fel a darabot.” [1]

„Az elektronsugaras huzaladagolású eljárásváltozat, amely a vákuumkamrába huzagadagoló segítségével bejuttatott huzalt olvasztja meg és így építi fel rétegről rétegre az alkatrészt.” [1]

„A huzaladagolású additív eljárásváltozatokhoz plazma vagy elektromos ív használható. A hegesztőhuzalos védőgázos additív gyártási eljárások WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) is komoly fejlődésen mentek keresztül. Ehhez nagymértékben hozzájárul a hegesztőrobotok nagy pontosságú vezérlései, hajtásai és az adaptív hegesztési eljárásváltozatok fejlesztése. A hegesztési paraméterek nagyon szűk tartományon belüli alkalmazásával lehetővé vált a vékonyfalú testek hegesztéssel történő létrehozása, illetve bonyolult struktúrák kialakítása.” [1]

„A szálkiszajtolásos modellezés (FDM - Fused Deposition Modelling) eljárásoknál fémhuzalt vagy egy különleges műanyagba kevert fémport tartalmazó huzalt úgynevezett filament alapanyagot olvadáspont alatti hőmérsékletre melegítenek, és sajtoló fúvókán keresztül juttatják ki a felületre rétegenként felépítve az úgynevezett „zöld” darabot. A zöld darabból ezután a műanyag hordozót mechanikus, majd vegyi tisztítási műveletet követően eltávolítják és kapjuk a „barna” darabot, amiből szinterezéssel állítják elő a végső alkatrészt. Ezen eljárásoknál a zsugorodás mértéke elérheti a 20 %-ot is. Eljárás változatok: FLM (Fused Layer Modeling, Fused Layer Manufacturing); FFF (Fused Filament Fabrication); BPE Bound Powder Deposition); ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing); FMP (Filament Metal Printing); MFDM (Metal Fused Deposition Modeling).” [1]

„A fröccsöntést és a sajtolást kombináló eljárások, ahol fémgranulátumok képezik az alapanyagot.” [1]

„A kötőanyag kilövelléses eljárás (BJ) elve hasonló a tintasugaras papírnyomtatáshoz használt eljáráshoz, csak itt nem festékanyagot, hanem kötőanyagot fecskendeznek fémporra. Az elterített fémport a kívánt mintázat szerint egy pásztázás alkalmával több sor fúvókán keresztül finomcseppes folyadék kötőanyaggal rögzítik, így alakítva ki soronként a kívánt végső darab „zöld” darabját. A gyártást követően kicsomagolják,

a felesleges port eltávolítják, majd oldószeres tisztítás után kapják a „barna” darabot, amiből szinterezéssel készítik el a végső darabot, amely max. 20%-kal zsugorodik a zöld darabhoz képest. Eljárás változatok: 3D nyomtatás; (Three Dimensional Printing), Inkjet 3D Printing; SPJ (Single Pass Jetting).” [1]

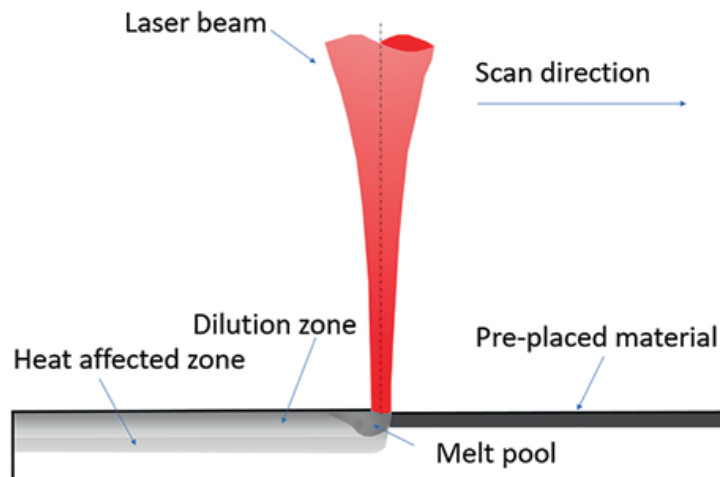
„Az anyagsugaras eljárás tulajdonképpen nanorészecske alapú additív gyártás NPJ (Nanoparticle Jetting), ahol nem kötőanyagot fecskendeznek egy platformra, hanem olyan speciális folyadékot, amelyben szuszpendált nano fémrészecskék találhatók. A terítést több száz fúvókán keresztül végzik és cseppenként építik fel a nagyon vékony, extrém magas felbontású rétegeket. A nyomtatófej elhaladását követően a hordozó folyadékot elpárologtatják, így alakítva ki soronként a kívánt végső darab „zöld” darabját. A gyártást követően kicsomagolás és oldószeres tisztítás után a „barna” darabot szinterezik.” [1]

2.2. Lézersugárral történő bevonatolás

2.2.1. LÉZERSUGARAS BEVONATOLÁSRÓL ÁLTALÁNOSÁGBAN

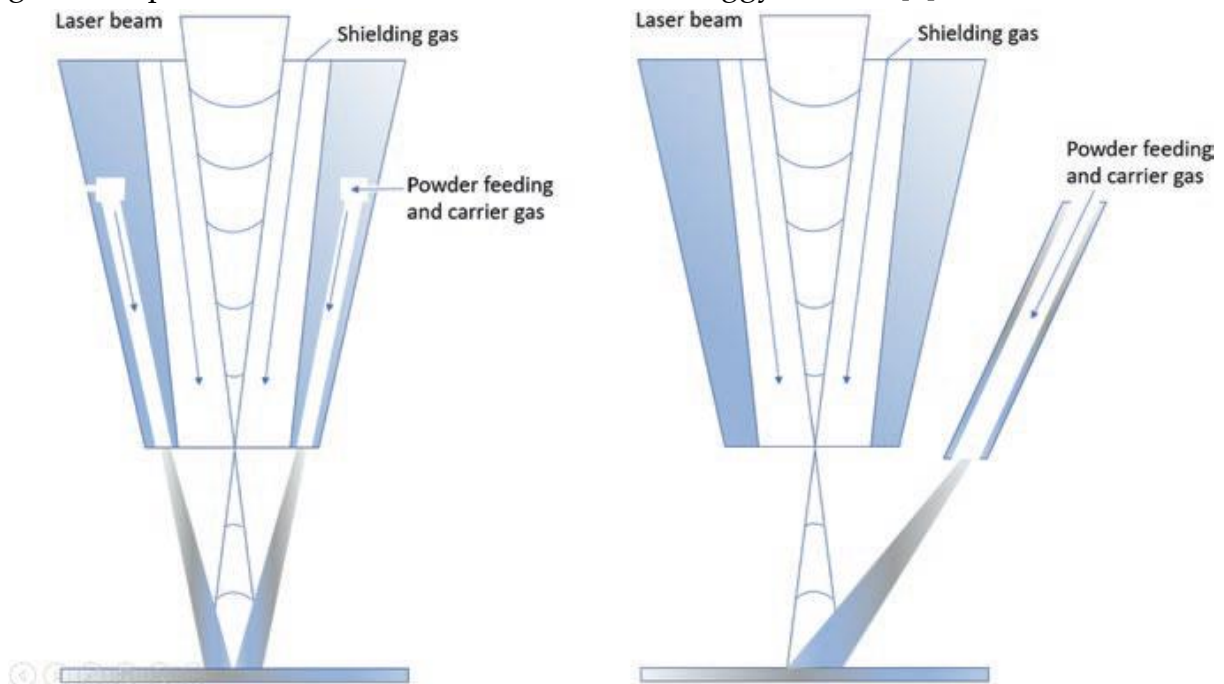
A lézersugárral történő bevonatolás – angolul: „laser metal deposition”, „laser power deposition”, „direct metal deposition”, „laser cladding”, „laser engineered net shaping” vagy „digital light fabrication” a közvetlen energiával megszilárdító additív eljárások közé tartozik. A lézersugarat energia forrásként használva a folyamat során, azt koaxiális fúvókával (melyen keresztül az alaptest felületére felvinni kívánt port adagolják) kombinálva háromdimenziós testek építésére illetve sérült szerszámok javítására használják a technológiát.[2]

A lézersugaras bevonatolás lényegében egy lézersugaras hegesztési eljárás, ahol az egyes varratokat első lépésként a bevonatolandó anyagra majd egymásra viszik fel a megfelelő geometriai elrendezésben. Legegyszerűbb esetekben fém felületek fémmel vagy karbidokkal történő bevonatolására használják. A technológia legtipikusabb alkalmazása közé tartozik különböző alkatrészek – melyek erős korróziós közegnek vannak kitéve – korrózióval szemben jól ellenálló bevonattal való megerősítése. A többi bevonatolási eljáráshoz képest a lézersugarat használó nagyobb fokú flexibilitással rendelkezik, ebből kifolyólag a lézer nagyobb beruházási igénye több esetben is megtérülhet. Az igényt a lézersugaras bevonatolás additív technológiaként való alkalmazására a különböző megalakító szerszámok javítási igénye szülte meg. [3]



2. Ábra: "Kétlépéses" lézersugaras bevonatolás egyszerűsített ábrája [4]

Összeségében elmondható, hogy a lézersugárral történő bevonatolásnak 3 fő fajtáját különböztetik meg a hozadék anyag adagolásának szempontjából: a porral történő adagolást, a huzal adagolást és a paszta felhasználását. Az ilyen módokon adagolt anyag a lézersugárból származó megfelelő mennyiségű hőnek köszönhetően képez bevonatot az alapanyag felületén. Az alaptest relatív mozgásával a poradagolása során különböző bevonatolási geometriákat lehet elérni. A bevonatoló anyag felületre történő eljuttatására különböző módszereket használnak az iparban, azonban lézersugarhoz képesti koaxiális és laterális elrendezés a leggyakoribb. [4]



3. Ábra: Hozadék anyag adagolásának koaxiális (balra) és laterális (jobbra) elrendezéseinek egyszerűsített ábrája [4]

Bizonyos esetekben a port a kötőanyaggal összekeverve a bevonatolás előtt az alap felületre helyezik. Ezt a fajta módszert csak síkfelületek esetében lehet alkalmazni és a ragasztó anyag eltávolítása után nagyfokú porozításra kell számítani a bevonatot képező anyagban. Továbbá repedések is felléphetnek, illetve a keletkezett bevonat –

alaptest között kicsi adhézióra kell számítani, ugyanis ebben az esetben a lézersugár energiájának csak kis része kerül abszorbeálásra. Hélium vagy Argon gázzal a por közvetlenül is az ömledékbe (melyet a lézersugár hozott létre) juttatható. Ezzel a technológiával kisebb porozitás, korrózióval szembeni jobb ellenálló képesség és jobb mechanikai tulajdonságok érhetőek el a bevonatoknál, mint a por és kötőanyag adott felületre történő előzetes felhelyezésével. Ezen előnyöknek köszönhetően a gázzal történő poradagolás napjainkban széleskörben elterjedté vált az iparban. [4] Továbbá a por tömegáramának megfelelő szabályozásával pontos alkatrészek gyártása válik lehetségessé. Ezzel ellentétben a huzalt használó lézersugaras bevonatolási technológiát kisebb pontosságot igénylő alkatrészek gyártására használják. [3]

Bonyolultabb bevonatolandó geometriák esetén a huzallal történő adagolást alkalmazzák a gyakorlatban. Ezen eljárás gazdaságosabb a porral történő adagoláshoz képest és a kötőanyag miatt fellépő nagyfokú porozitás is elkerülhető. [4] Általánosságban a fémhuzalok alacsonyabb áron rendelkezésre állnak a piacon, mint a fémporok, azonban a fix vegyi összetétel miatt a különböző anyagok ötvözése csak a huzalszál bevonatolásával lehetséges.

A paszta felhasználásakor a pasztát a bevonatolandó felületre helyezik a hőközlés időtartama alatt. Ezen folyamatnak is a fő befolyásoló tényezői a kötőanyag – rendszerbe bevitt hő kapcsolata és a hozzájuk kapcsolódó zavaró tényezők. [4]

Általánosságban elmondható, hogy egy lézersugaras bevonatoló berendezés az alábbi egységekből épül fel: lézersugár forrása, adagoló fej, számjegyzérlés és védőburkokat. A lézersugár szükséges teljesítményét a bevonatolásra használni kívánt anyag és bevonatképződési arány határozza meg. Tipikusan 0,5 – 3 kW-os infravörös közeli dióda, szál vagy disk lézereket használnak a gyakorlatban. [3]

A lézersugárral történő bevonatolásra anyagok széles skálája használható fel. Az egyetlen fő követelmény a használt technológiától függően, hogy a felhasználni kívánt anyag por vagy huzal formájában rendelkezésre álljon. A por alapú bevonatoló anyagok egyik nagy előnye, hogy az anyagösszetétel könnyen módosítható. Még egymással más körülmények között ötvözhetetlen anyagok, mint a fémek és kerámiák kombinálása is lehetséges. A feldolgozható, atomizált fémpor minősége egészen az egyszerűbb szerkezeti acéloktól a különleges szupernikkel ötvözetekig terjed. [3]

2.2.2. LÉZERSUGARAS BEVONATOLÁS PARAMÉTEREI

A bevonatolás során a paraméterek széles skáláját szolgáltatja a bevonatoló anyag, a bevonatolandó anyag és geometria. A bevonatolás minőségének az eredményét meghatározzák magának a bevonatolás folyamatának a paraméterei. A legnagyobb befolyással ezek közül a lézersugár teljesítményének P (W) és az előtolásának f (m/s) van. Ezen két paraméter kapcsolatát, mint „lineáris” energia lehet leírni:

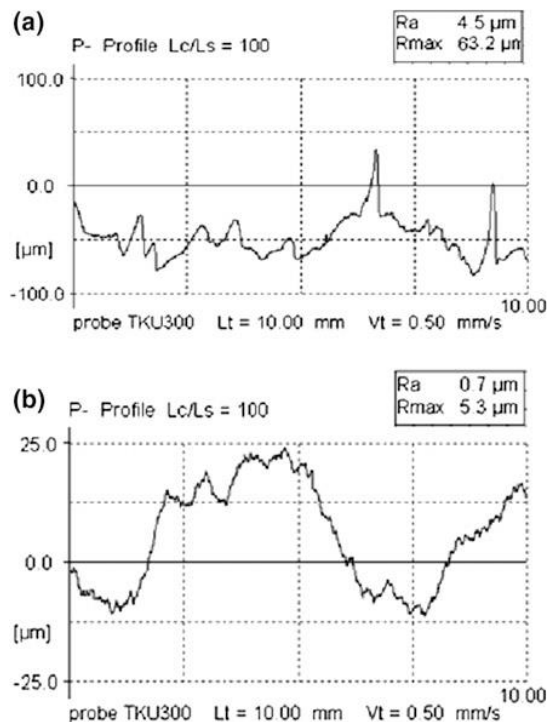
$$E = P/f \quad (2.2.2.1.)$$

Ezen paraméter adja meg a rendszerbe bevitt energia nagyságát és határozza meg az ömledék méreteit. A fej előtolási sebessége az össz gyártási időre, míg a hőbevitel a hőhatás zóna méretét határozza meg. A másik fő befolyásoló tényező a használt anyag és azok anyagtulajdonságai, melyek rendre a következők: Olvadási pont, hegeszthetőség, felületi feszültség a folyadék fázisban, fény visszaverés és a lézer fény abszorpciója. Továbbá adott körülmények között a korábban felsorolt paramétereken kívül mások is kritikussá válhatnak, ha a hő egyenletes eloszlása korlátozott, például a geometria hirtelen változása miatt, akkor a védő / hordozó gáz fajtája és térfogat áram válhat kritikussá. [3]

2.2.2.1. Lézersugár teljesítménye

A kutatások bebizonyították, hogy a lézersugár teljesítménye nagy befolyással bír a keletkező darab különböző tulajdonságaira: mind a keletkező felület minőségére, mind a megszilárduló anyag mikroszerkezetére hatással van. Éppen ezért a lézersugár teljesítménye egy fontos technológiai paraméter, melyet a sikeres gyártás érdekében a folyamat alatt megfelelően szabályozni kell. A lézersugár teljesítményét a bevonatoló anyag és a külső körülményeknek megfelelően kell meghatározni. A lézersugár teljesítményének az értékét megfelelően kell megválasztani: nem szabad túl magas értéket előírni, de túl alacsony értéket sem szabad megadni. Túl nagy értékű teljesítmény esetében az ömledék hígulni (dilution) kezd, az anyag elpárologhat vagy plazma állapotba kerülhet. A lézersugárral történő bevonatolás esetében egyik előbbi jelenség sem kívánatos. A másik oldalról viszont, a túl kicsinek megválasztott teljesítmény nem elegendő a por megfelelő mértékű megolvasztásához, mely a keletkező bevonat porozitásához fog vezetni. Tovább menve előfordulhat, hogy az alaptestre felvinni kívánt por egyáltalán nem olvad meg. Ezek alapján kulcs fontosságú a megfelelő teljesítmény megválasztása a lézersugár esetében.[2]

A felület érdesség a lézersugár teljesítményének növelésével csökken. Továbbá a felület egyenletlensége / hullámossága is csökken a teljesítmény növelésével. [5] Ennek a magyarázata a következő: a nagyobb teljesítmény jobb olvadást tesz lehetővé a por számára, illetve nagyobb ömledék keletkezik mely magasabb megszilárdulás arányt tesz lehetővé., illetve az ömledék szélén a Marangoni áramlás mértéke is csökken. A 4. Ábrán látható egy minta felületi érdesség profilja kicsi (a) és nagy (b) lézersugár teljesítmény mellett. A 4. Ábrán látható nagy eltérések a profilban a meg nem olvadt, „maradék” por miatt alakult ki. [5]



4. Ábra: Felületi érdesség profilja alacsony (a) és magas (b) lézersugár teljesítmény esetén [5]

Más kutatások [6] a lézersugár folytonosságának a hatását vizsgálták a kialakuló felület minőségére. A tanulmány [6] megállapította, hogy magas átlagos lézersugár teljesítmény a felület minőségének javulásához vezet. A tanulmányban [6] továbbá kimutatták, hogy a lézer kvázi folytonos pulzáló üzemmódban történő használata jobb felületi minőséget eredményez mint, a teljesen folytonos üzemmód esetében. Ha a lézert folytonos üzemmódban adott átlagteljesítmény mellett használták, akkor a több ciklus esetében értek el jobb felületi minőséget. [6]

A nagy lézersugár sugárteljesítmény nagyobb ömledék fürdőt eredményez, ami a megszilárdulási időt növeli. Nagy megszilárdulási idő esetén pedig egyensúlyi átalakulás megy végbe a mikrostruktúrában. Ravi [7] és kollégái a lézersugár teljesítményének a szövetszerkezetre gyakorolt hatását vizsgálták Ti6Al4V ötvözet esetében. Az eredményei azt mutatták, hogy mind a lézersugár üzemeltetési módja (mely lehet folytonos vagy szaggatott), mind a lézersugár teljesítményének nagy hatása van a kialakuló mikrostruktúrára. A szövetszerkezet-analízis megmutattatta, hogy a folyamatos üzemmódban működő lézer esetében nagy, jól kivehető oszlopos szemcsék keletkeztek, míg pulzált módban sokkal finomabb ekviaxiális szemcsék keletkeztek. Megállapították, hogy adott nagyobb lézersugár teljesítmény mellett a lézerüzemeltetésnek módjától függetlenül nagyobb teljesítmény esetén nagyobb és durvább szemcsék keletkeznek, és hogy a lézersugár teljesítménye szignifikánsan nagyobb hatás gyakorol a keletkezett szövetszerkezetre. Kisebb lézersugár teljesítmény esetén elsődlegesen nagyon finom, tűszerű szemcseszerkezet keletkezik – mint az alfa martenzites fázis -, míg nagyobb lézersugár teljesítmény esetén vegyesen alfa és béta fázis durvább lemezs szemcseszerkezet keletkezik. [6]

2.2.2.2. Pásztázási sebesség

A pásztázási sebesség meghatározza azon időintervallum hosszát, ami alatt a lézersugár az alapanyag felületével és a bevonatolásra használt anyaggal interakcióban van. Alacsony pásztázási sebesség esetén ezen interakció időtartalma hosszú. Túl alacsony pásztázási sebesség esetén nagy lesz a bevonatoló anyag és az alapanyag hígulása. Bizonyos esetekben az ömledék párolgását is eredményezheti, ami egy nem kívánt jelenség jelen gyártástechnológia esetében. Ezzel ellentétben túl nagy pásztázási sebesség esetén csak nagyon rövid időintervallum alatt jöhet létre interakció a lézersugár és a bevonatoló anyag -alapanyag között, ami nem megfelelő ömledék létrejöttét eredményezi, vagy az ömledék létrejöttének a hiányát. A lézersugár teljesítménye és a pásztázási sebesség között kapcsolat van, mely kapcsolatot az Energia sűrűséggel lehet jellemezni [2]:

$$E = \frac{P}{d \cdot v} \quad (2.2.2.2.1.)$$

Ahol:

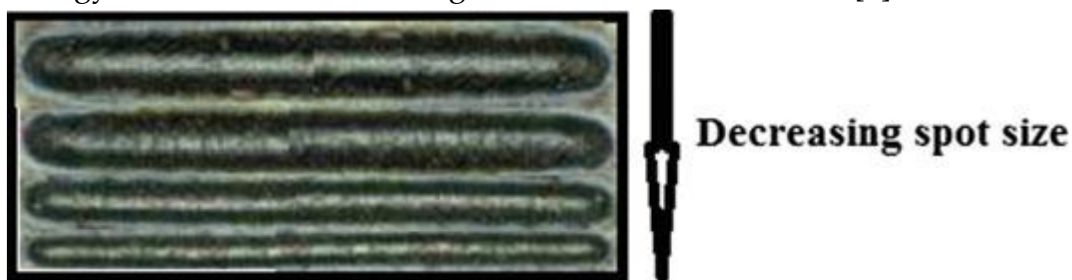
- $E \left(\frac{J}{mm^2} \right)$: az energiasűrűség;
- $P (W)$: a lézersugár teljesítménye;
- $d (mm)$: a lézersugár átmérője;
- $v \left(\frac{mm}{s} \right)$: pásztázási sebesség;

A 2.2.2.2.1- es képlet alapján megállapítható, hogy az energiasűrűség egyenesen arányos a lézersugár teljesítményével és fordítottan arányos a pásztázási sebesség és lézersugár átmérő nagyságával. Ez alapján az energiasűrűség értéke nő, ha a lézersugár teljesítménye növekszik, illetve ha csökken a pásztázási sebesség és vagy lézersugár átmérő nagysága csökken. [2]

Az új kristályszerkezet kialakulás abban a pillanatban megkezdődik, amint az ömledék megszilárdulása elindul. A kialakulandó mikroszerkezetet meghatározza a bevonatolás során keletkezett ömledék mérete, ami meghatározza az ömledék megszilárdulási sebességét. Alacsony pásztázási sebesség nagy ömledék fürdő létrejöttét teszi lehetővé. Nagy ömledék fürdő a megszilárdulás sebességét csökkenti, ami befolyással van a keletkező kristály szerkezetre [2]-sík kristályosodás léphet fel [8], melynek során durva, nagy méretű szemcsék keletkeznek [2]. Nagymértékű pásztázási sebesség esetén kisméretű ömledék fürdő tud létre jönni, ami gyors megszilárdulást tesz lehetővé, ezáltal az előbbihez képest eltérő szemcseszerkezet jön létre. Tehát a pásztázási sebesség nagymértékben meghatározza a gyártott darab mikroszerkezetét ezáltal annak fizikai és mechanikai tulajdonságait. Éppen ezért kulcsfontosságú a pásztázási sebesség szerepének megértése a folyamatban, hogy a megfelelő szabályozással a gyártmány kívánt metallurgiai, mechanikai és tribológiai tulajdonságokat lehessen elérni.

2.2.2.3. Lézersugár átmérő és átfedési arány

A lézersugár átmérője (angolul „laser beam diameter” vagy „Spot Size”) a lézersugárnak a megadott távolságra lévő gyújtópontban a lézersugárra merőleges síkban milliméterben mérhető átmérőjét jelenti. Ezen paraméter nagy befolyással van az energiasűrűségre, ahogy az a 2.2.2.2.1.-as képletben is látható. Kisméretű lézersugár átmérő esetén nagy energiasűrűség keletkezik. A lézersugár átmérőjének csökkentésével a lézer nyomása drasztikusan megnövekszik, ami érzékelhető a jelen additív technológiát nagymértékben meghatározó energiasűrűségben is. A lézersugár átmérője meghatározza a rétegvastagság nagyságát. Ha nagyon nagy pontosságú, bonyolult geometriát kell legyártani, akkor kis lézersugár átmérőt kell alkalmazni. [2]



5. Ábra: Lézersugár átmérőjének csökkentését bemutató próbagyártás[2]

Egy másik fontos additív technológiai paraméter a lézersugaras bevonatolás esetében az átfedés (angolul: „overlap”), mely megadja, hogy az előzőleg felvitt sávot hány százalékban fedje le az újonnan felvitt sáv. A megfelelő átfedés megválasztása nélkülözhetetlen a pályák/vonalak/sávok közti porozitás és a rétegek közti porozitás elkerülése végett. Ezáltal jelen paraméter nagy hatást gyakorol a gyártmány sűrűségére. [2]

2.2.3. LÉZERSUGÁRRAL TÖRTÉNŐ BEVONATOLÁS ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

A lézersugárral történő bevonatolásnak fő előnye a jó kopásállósága a bevonatnak, a kis hőhatásövezet, a kevés maradó feszültség az anyagban, a nagy pontosságú gyártás, és a csökkentett gyártási idők. Ezen technológiával olyan alkatrészek is gazdaságosan is javíthatóvá váltak, melyeket korábban javíthatatlannak minősítettek. [4]

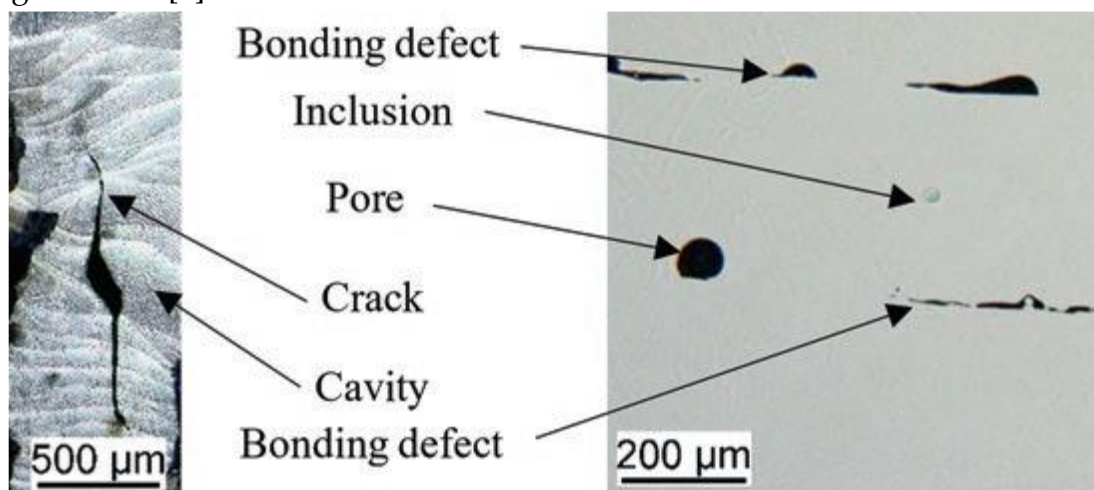
A lézersugárral történő bevonatolás előnye, hogy új alkatrészek hozhatók vele létre, illetve meglévő darab felületére új geometria állítható elő, mely erős metallurgiai kapcsolattal rendelkezik az alaptesttel. Legnagyobb előnye a technológiának, mellyel semmilyen más additív vagy hagyományos technológia eddig nem rendelkezik, hogy már meglévő munkadarab felületére létrehozhatunk egy új geometriát. Korábban, ha két darabok össze kellett kapcsolni, akkor valamilyen hagyományos kötéstípust alkalmaztak (például csavarkötés). Ezek problémás pontokká váltak a konstrukciókban, feszültség-gyújtó helyekké alakulhattak át, mert nem egyeztek meg az összekapcsolt alkatrészek tulajdonságai, vagy, mert „töréspontot” képeztek a szerkezet folytonosságában. A legtöbb károsodási folyamat ezekben a pontokban alakul ki, különösen így van ez a

mozgó alkatrészek esetében. Ezt a problémát oldja meg a lézersugárral történő bevonatolás, ugyanis az új alkatrész a másik felületén erő metallurgiai kapcsolattal keletkezik, hagyományos kötési technológia (például hegesztés vagy csavarkötés) felhasználása nélkül. Ezzel párhuzamosan segít csökkenteni a szerkezet tömegét, gazdaságosabbá téve a gyártás folyamatát. [2]

Ezen technológia nagyobb konstrukciós szabadságot biztosít a tervezők számára, hiszen lényegében amilyen alkatrészt képes a tervező lemodellezni, azt a modellt megfelelő berendezéssel elő is lehet állítani. A meglévő konstrukciót könnyű módosítani és sérült alkatrész javítása is lehetséges idő, pénz és energia megtakarítás mellett. [2]

A technológiával olyan anyagok is felhasználhatók, melyek korábban más technológiákkal nem. A különböző porok kombinálása is lehetséges, vagyis tetszőleges ötvözetek gyártása válik lehetségessé ezen technológia alkalmazásával. A technológiával korábban nem, vagy nehezen javíthatónak ítélt alkatrészek javítása is lehetségessé válik. [2]

A bevonatoláshoz használt por tulajdonságai és a rendszerbe bevitt hő hatása miatt nem akart változásokhoz vezetnek a mikro és makroszkopikus megjelenésben. Az értékes, de nehezen hegeszthető fémek alkalmazása bonyolultabb folyamatokat eredményez és behatárolja az egyes paramétertartományok szélességét. Hibák léphetnek fel a gyártás folyamata során, kezdve az egészen kisméretű pórusoktól, a nagyobb méretű hőhatás okozta repedéseken át, egészen a 6. Ábrán látható kötési hibákig. Ezek a 6. képen látható kötési hibák tipikusnak nevezhetők ennél a gyártástechnológiánál. Oka a folyamat nem megfelelő energiabevitele, melynek eredményeképpen elnyújtott pórusok keletkeznek. Ezek a gázzal megtelt pórusok később repedések kiinduló helyeül szolgálhatnak. [3]



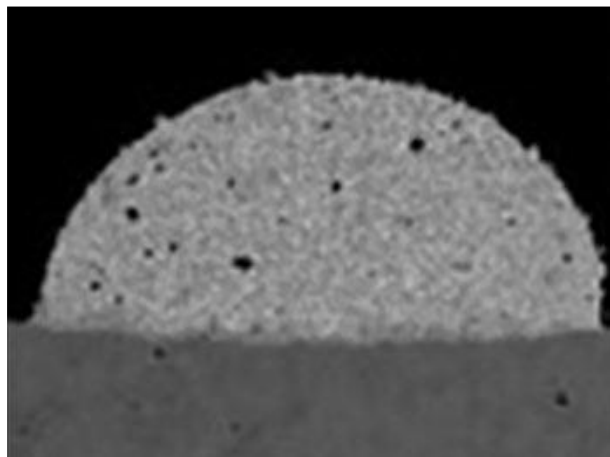
6. Ábra: Lézersugaras bevonatolás során fellépő hibák (3)

Az oxidáció jelensége komoly kihívást jelent a lézersugárral történő bevonatolás során, mert nagyméretű gyártandó alkatrész esetében csak kis területen lehetséges az inert atmoszféra fenntartása. A gyártási folyamat alatt a nem védett területeken a levegő oxigén tartalma reakcióba léphet a darab anyagával és nem kívánt oxidok kiala-

kulását eredményezheti. Másik gyakori makroszkopikus hiba a technológia alkalmazása során, a nem kielégítő geometriai pontosság. A hőkapacitás minden egyes réteggel változik, különösen a sarkokon, ahol a hő koncentrálódik. További nagy korlátja ezen technológiának a gyártandó darab bonyolultsága és a felrakás közti kompromisszum szükségessége. 100 μm pontoasságú darabok is elérhetőek jelen technológiával, azonban a gyártáshoz használt por tömegáramának 0,5-1 g/perc-nek kell lennie. Nagyobb lézersugár átmérők, csökkentik a geometriai pontosságot, azonban nagyobb por tömegáramot tesznek lehetővé. [2,3]

2.2.4. LÉZERSUGARAS BEVONATOLT ANYAGOK MIKROSTRUKTÚRÁJA

A lézersugár által fókuszáltan bevitt hő egy tipikusnak mondható bevonat geometriát eredményez: egy ellipszist, melynek a fő tengelye merőleges a gyártáshoz használt lézersugár tengelyére, erre szolgál kiváló például a 7. Ábra. A bevonatolás után a végső struktúra a bevonatból, a hőhatás övezetből (H.A.Z. Heat Affected Zone) és a hőhatásmentes alapanyagból áll. [4]



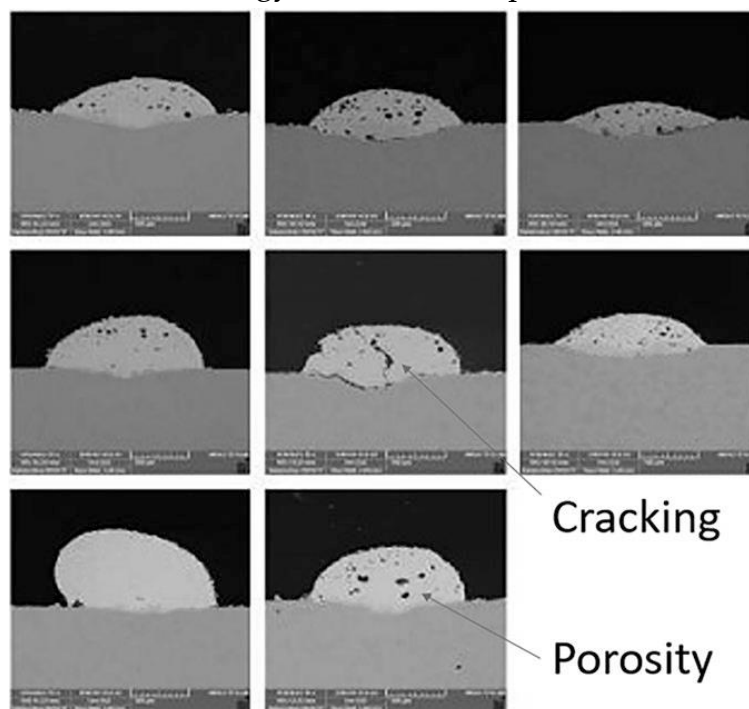
7. Ábra: Egy tipikus keresztmetszet a lézersugárral történő bevonatolás esetében [4]

Általában a bevonat mikrostruktúrája nem egységes, a bevonatot ért különböző hőhatások miatt. Ez a jelenség befolyásolja a maradó feszültséget az anyagban és a fáradási tulajdonságait az anyagnak, különösen a repedésterjedés a különböző szilárdságú anyagokban. Egy másik fontos szempont a hígulás (dilution). A hígulást a lézersugaras bevonatolás során a diffúz kötések segítségével érik el. A fő befolyásoló tényezők a lézersugárral történő bevonatolás során a bevonat kismértékű behatolása az alapanyagba és az alapanyag alacsony hígulása. A hígulás megléte egy metallurgiai kapcsolathoz vezet az alapanyag és a bevonat között. Az alapanyag és a bevonat közötti erő kötés kialakulásához az olvadéknak be kell hatolni az alaptest anyagába. A hígulás a szilárd és a folyékony fázis között kialakuló kapcsolat miatt jön létre. Ez a kapcsolat (fúzió) általában erős és jó ellenálló képességgel rendelkezik a hirtelen mechanikai és

hőtani hatásokkal szemben. Az alapanyag megolvadása és a hígulás is szükséges folyamatok a bevonatolás során, azonban a hígulás jelentős mértékben meghatározza a bevonat minőségét és geometriáját. [4]

Számtalan kutatás bebizonyította, hogy a keménység a bevonatok külső felületén magas, azonban a bevonat belseje felé haladva a keménység értéke csökken. Ezért a bevonatok külső rétegén kisebb a valószínűsége repedések kialakulásának, azonban ha egyszer kialakult egy repedés, akkor az a bevonat belseje felé könnyen tovább tud terjedni. A repedések jelenléte tipikusnak mondható a lézersugárral végzett bevonatolások esetén. Ez a megszilárdulás során fellépő hősokk, a magas keménységű lokális szegregációkkal és az olvadékból a megszilárdulás során jelenlévő szennyeződésekkel magyarázható. Ezek a hőhatás miatt fellépő feszültségek az alapanyag – alaptest előmelegítésével szabályozhatók, mert csökkentik a hőgradiens mértékét. Szén vagy kerámia szemcsék hozzáadásával a repedés kialakulásának veszélye tovább csökkenthető. [4]

A bevonatok esetében másik tipikusan fellépő hiba a gáz porozitás. Különböző porozitásokra szolgál jó példának a 8. Ábra. A porozitás erős összefüggésben van a megfelelő folyamat-paraméterek meghatározásával. A pórusok kiindulási helyül szolgálhatnak a repedéseknek, melyek jelentősen növelik az anyag idő előtti kifáradásának esélyét. A lézersugaras bevonatolás alatt az ömledékméret növekszik a folyamatos hőbevitel hatására. Amikor a hőbevitel megszűnik az olvadék adott területén, akkor az olvadék hőmérséklete el kezd csökkenni és a por feloldó képessége is csökkenni kezd és ez a bevonaton belüli porozitást okozhat. Ennek csökkentési módja lehet a lézersugár teljesítményének növelése, vagy kisebb méretű por használata. [4]



8. Ábra: Bevonatokban fellépő repedés és porozítások [4]

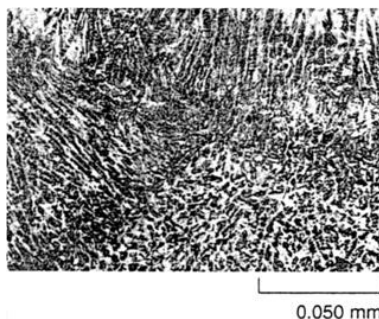
2.3. Esettanulmányok

2.3.1. H13-AS SZERSZÁMACÉL

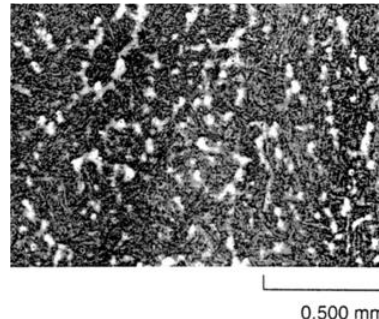
Mazumder és társai additív technológiával – Direct Metal Deposition - gyártott AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél tulajdonságait vizsgálták. Nyers és hőkezelt daraboknak vizsgálták a mikroszerkezetét, meghatározták a mechanikai tulajdonságaikat és vizsgálták a darabban fennmaradó feszültségeket. A vizsgálataik során két paraméter „csomaggal” végeztek próbagyártásokat: egy, a szerzők által „durvának” – magas lézersugár teljesítmény, nagy pásztázási sebesség és nagymértékű poradagolás -, illetve „finomnak” - alacsony lézersugár teljesítmény, alacsony pásztázási sebesség és kismértékű poradagolás – nevezett technológiai paraméterekkel dolgoztak. A „durva” gyártás estében 1,1 mm-es lézersugár átmérőt; 3,5 mm-es raszter távot; 4500 W-os lézersugár teljesítményt és 16 g/perc-es fémpor tömegáramot alkalmaztak. Ezen paraméterekkel kis szén-tartalmú alaplapra egy 3,5 mm-es falvastagságú 70 mm magas 120 mm hosszú falat gyártottak. A szerzők által „finom”-nak nevezett paraméter „csomagot” rendre a következők alkották: 0,6 mm-es lézersugár átmérő, 1000 W-os lézersugárteljesítmény; 5 g/perc-es fémpor tömegáram. Mindkét esetben 250 μm -es rétegvastagságot és 750 mm/perc-es pásztázási sebességet használtak. Az additív technológiával készült darabokból próbatesteket munkáltak ki, melyeket különböző hőkezeléseknek vetettek alá: bizonyos darabokat megeresztettek 375 - 600 °C-os hőmérsékleten 2 órán keresztül adott hőmérsékleten tartva. Más darabokat 1010 °C-on austenitizáltak, olajba mártva edzették őket és végül 2 órán keresztül 400 - 650 °C-os hőmérsékleten tartással megeresztették őket. [9]



9. Ábra: "Finom" bevonatolás mikroszkópikus képek [9]



10. Ábra: "Finom" bevonatolás szövetszerkezet [9]



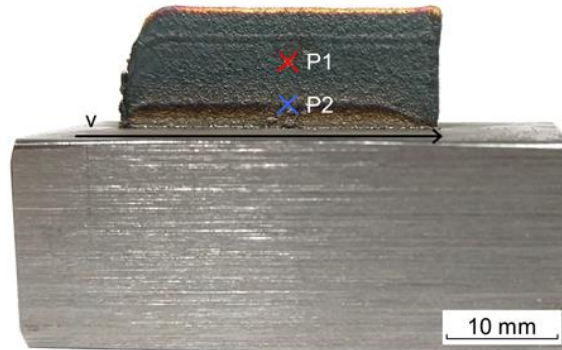
11. Ábra: "Durva" bevonatolás szövetszerkezet [9]

A „finom” paraméterekkel gyártott darab esetében 4 „terület” különíthető el a mikroszkópos képen lásd. 9. Ábra. Az első maga az ömledék, mely a lágyított H13-as acél tipikus képét mutatja: ferrit mátrixban számos kisméretű ötvöző-karbid található. Az

alaplapban jól kivehető hőhatás övezetben megeresztett martenzit található. A 9. Ábrán megfigyelhető a minta színváltozása: a felsőbb rétegek fehérek, míg a gyártás során elsőként lerakott rétegek sötétek vagy feketék. Az alkalmazott technológia sajátossága, hogy a darabot rétegről rétegre építik fel, mindig az előzőre fektetve az új réteget. Így a felvitt réteg nem tud teljesen kihűlni, mert az újonnan felvitt réteg hőjének egy része az előzőleg felvitt rétegen keresztül távozik el. Tehát az alsóbb rétegek a gyártás során folyamatosan újabb és újabb hőkezeléseknek vannak kitéve. Lényegében megeresztésre kerül az anyag. Ezért az 9. Ábrán látható alsó rétegek sötét színe a kialakult megeresztett martenzit adja, míg a felső rétegek nem szenvedtek el ismétlődő hőkezeléseket a gyártás során, megfelelő mennyiségű idő ált rendelkezésükre kihűlni, így újra ausztenit képződés (re-austenised) játszódhatott le. A hőkezelt darabok esetében 500 °C-ig végzett megeresztések esetében a próbatestek mikroszerkezete lényegi változást nem mutatott, azonban 600 °C fölött végzett megeresztés esetében a dendrites karbidos szerkezet önálló kisebb karbidokra bomlott fel. 400 - 500 °C-on végzett megeresztésig a darab keménysége növekszik, azonban, ha a megeresztési hőmérsékletet 500 °C fölé vitték, akkor a keménység nagysága csökkenni kezdett. A hőhatás övezetben 600 °C-nál figyelték meg a megeresztést. Az ausztenitizált, edzett és megeresztett darab esetében megfigyelt, hogy az additívan gyártott illetve hagyományos technológiával gyártott H13-as acélok hasonlóan viselkednek. A megeresztési hőmérséklet növelésével az anyag elkezd kilágyulni. Másodlagos keményedés figyelhető meg 400 °C-500 °C környéken, mely a hagyományos technológiával gyártott acél esetében volt jelentős. A két acél esetében a mikroszerkezet is hasonló volt: megeresztett martenzitet, maradék martenzitet és kevés ausztenitet tartalmaztak. Az 1010 °C-on végzett ausztenitizálás során a dendrites szerkezet eltűnt. A „finom” paraméterekkel gyártott darabok átlagos keménysége 690 HK volt, míg a „durva” paraméterekkel gyártottak esetében 675 HK. A próbagyártásokból kiforgácsolt próbatestet szakítóvizsgálatnak vetették alá, melyből kiderült, hogy az anyag folyáshatára 1505 MPa, míg szakítószilárdsága 1820 MPa volt. [9]

Bohlen és társai a vékony falú H13-as acélból additív technológiával gyártott mintadarab megszilárdulási és kihűlési tulajdonságait vizsgálták. A gyártott mintadarabokon metallográfia vizsgálatokat és keménység mérést hajtott végre. 50 µm-100 µm méretű H13-as acél port vittek fel S235JR alaplapra egy 4kW-os Triumph HL 4006-as Nd:YAG lézer segítségével, koaxiális fúvókán keresztül. Az általuk alkalmazott technológiai paraméterek rendre a következők voltak: 1,2 g/perc-es fémpor tömegáram; 800 µm-es lézersugár átmérő; 150 W-os lézersugár teljesítmény, azonban az első réteget 300 W-os lézersugár teljesítménnyel vitték fel; 300 mm/perc-es pásztázási sebesség. Mintegy 60 darab réteget vittek fel 30 mm hosszan, így 8,2 mm-es darabmagasságot sikerült elérniük – lásd.: 12. Ábra. Dilatόμεteres vizsgálat céljára is gyártottak 0,8 mm-es falvastagságú 4 mm átmérőjű próbatestet, melyet 130 rétegből építettek fel és végül 13 mm magas lett. [10]

Laser	Trumpf HL4006D	Powder mass flow	1.2 g/min
Laser spot size	800 μ m	Powder material	1.2344
Laser beam power	150 W	Substrate material	S235JR
Welding speed	300 mm/min	Number of layers	80

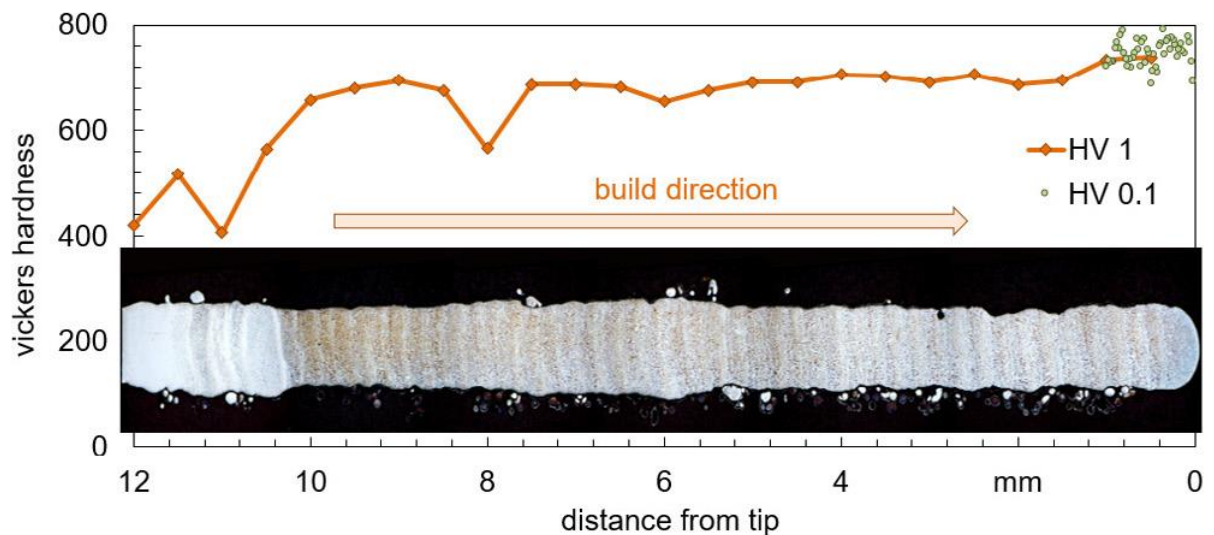


Bohlen 2017

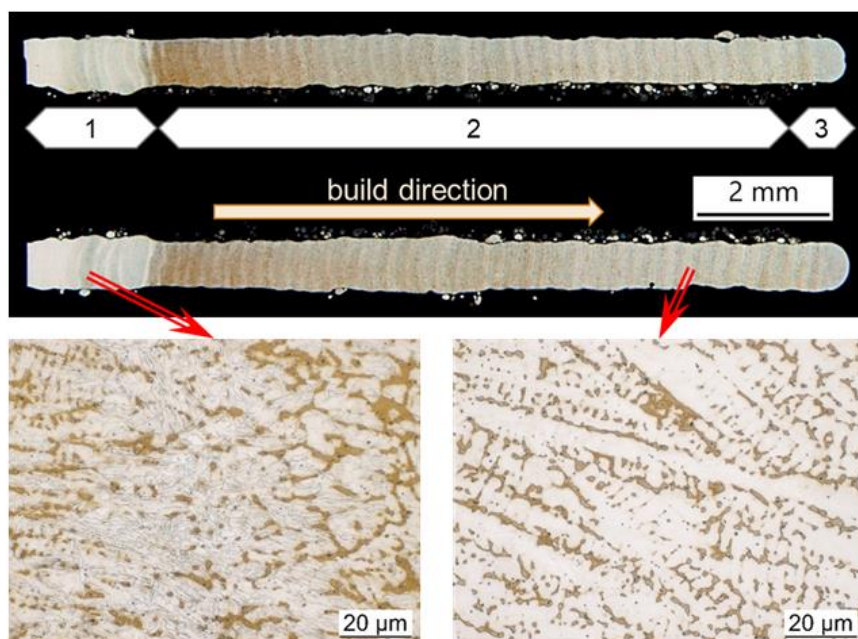
BIAS ID 180323

12. Ábra: "LMD" technológiával gyártott vékonyfalú próbadarab [10]

A gyártott darabokon metallográfiai vizsgálatokat és keménység mérést hajtottak végre. A keménység mérések alapján megállapították, hogy az időben utoljára felvitt rétegek magasabb keménységgel rendelkeznek, mint az alacsonyabban fekvő rétegek. A dilatόμεteres vizsgálatra szánt próbatesten belül a keménység 400-600 HV között mozgott, míg az utolsó réteg esetében 730-750 HV körül. A vékonyfalú próbatest alsó rétegén 420 HV-t mértek, míg az utolsónak felvitt rétegesetében 680 HV-t. A keménység profil a 13. Ábrán látható.



13. Ábra: A dilatόμεteres vizsgálatra készített próbatest keménység profilja (fent) és a keménység profilhoz tartozó metszet (lent) [10]



14. Ábra: A dilatációs vizsgálatra készített próbatest makroszkopikus (fent) és mikroszkopikus (lent) felvétele [10]

Az alkalmazott technológiára jellemző az úgynevezett „intrinsic” hőkezelés. Ennek során a korábban felvitt rétegek ismétlődő melegítésnek vannak kitéve az újonnan felvitt rétegek által. Ez a jelenség az AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél mikroszerkezetére komoly hatással van. Egy adott felvitt rétegben a gyors lehűlés miatt a martenzit kialakulásához szükséges hőmérséklet olyan mértékben lecsökken, hogy még az új réteg felvitele okozta újra melegítés előtt martenzit alakul ki. A martenzit, reauszténitizálás, megeresztés erősen függ a gyártandó alkatrész geometriájától, a technológiai paraméterektől, illetve a darabon belüli elhelyezkedéstől. A gyártott darabok legfelső rétegének esetében nincs újra melegítés, martenzit fog képződni auszténit helyet és megeresztés nélkül. Bohlen és társai mintadarabjainak szövetszerkezet a 14. Ábrán látható. [10] Ez megegyezik Mazumder és társainak vizsgálati eredményeivel. [9] Illetve magyarázatot ad a különböző rétegek közötti eltérő keménységre. Általánosságban megállapították, hogy a lézersugaras bevonatolással gyártott „nyers” darabokra inhomogén anyagszerkezet jellemző. Bohlen és társai végül a következő konklúziókat vonták le vizsgálataikból: vékony falú darabok repedés és pórus nélküli gyártása lehetséges az alkalmazott additív technológiával; a technológiából adódó „intrinsic” hőkezelés miatt a gyártott darab inhomogén mikroszerkezetű lesz. Ezért a darabot vagy az általa elviselendő terhelésnek megfelelően kell megtervezni (az időben utoljára felvitt rétegek rendelkeznek nagyobb keménységgel), vagy szükséges az additívan gyártott darabok utólagos hőkezelése. [10]

Lizzula, Sorgato és társaik [11] a lézersugárral történő bevonatolás esetében a folyamat paraméterek és a technológiával gyártott darab (mind a „nyers” és az utólag megmunkált esetében) minősége közti erős korrelációról számoltak be cikkükben. [11] Vizsgálataik során C45-ös acél felületére gyártottak több rétegű AISI szerinti H13-as anyagú -kémiai összetételét lásd 1. Táblázat- darabokat. Vizsgálataikhoz egy 3 kW-os

koaxiális szórófejet használtak, melyet robotkarral mozgattak és megfelelő poradagolóval táplálták a szükséges fémport. A korrózió mértékének csökkentése érdekében inertgázt alkalmaztak 20 l/min-es térfogat árammal. Az általuk alkalmazott technológiai paraméterek a 2. Táblázatban láthatók. Első körben adott számú réteget (4 darabot: az öntvények bevonatolásának ipar gyakorlata szerint) vittek fel az alaplapra és a technológiai paramétereket változtatták – lézersugár teljesítménye pásztázási sebesség és az alkalmazott por méret. Céljuk a megfelelő folyamat-paraméterek meghatározása volt, melyek alkalmazásával homogén, kis porozitású és nagy mikrokeménységű bevonat készíthető. A második vizsgálati sorozatban az első alapján kiválasztott, állandó technológia paraméterekkel és fémpor mérettel dolgoztak. Ebben a vizsgálati körben a rétegek számát változtatták, hogy ezen változtatásnak a bevonatnak a mechanikai és kvalitatív tulajdonságai gyakorolt hatását vizsgálhassák. [11]

1. Táblázat: AISI H13-as melegalakító szerszámacél kémiai összetétele [11]

C	S	Cr	Fe	Mn	Mo	P	Si	V
0.38	<0.001	5.40	Bal.	0.41	1.38	0.02	1.21	1.09

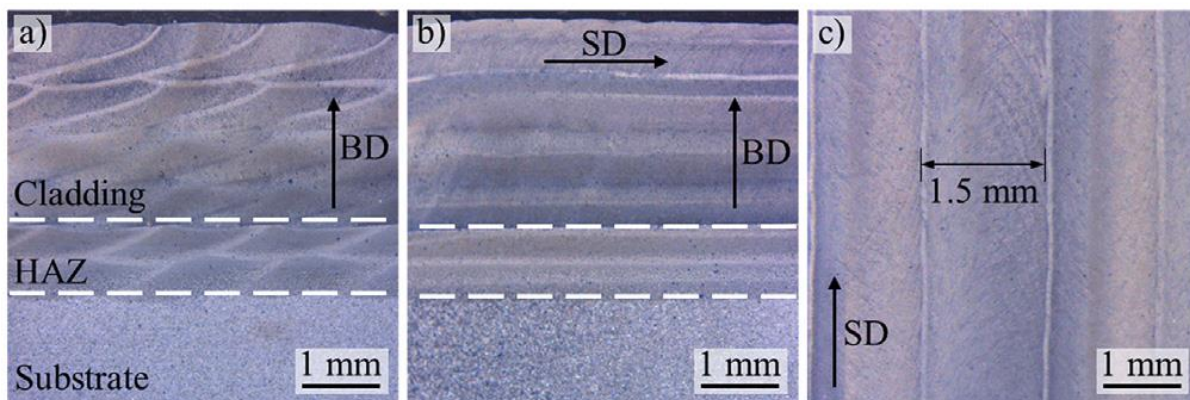
2. Táblázat: Lizzul, Sorgato és társaik által alkalmazott additív technológiai paraméterek [11]

Parameter	Value(s)
Powder size range (G)	50–100 μm /100–150 μm
Laser power (P)	900 W/1000 W/1100 W
Scanning speed (v)	7 mm/s/10 mm/s
Track to track offset	1.5 mm
Tracks overlap	55%
Powder feed rate	1.5 RPM
Nozzle tilt angle	11°
Scanning strategy	Raster
No. of layers	4

A különböző rétegszámú próbatestek forgácsolhatósági vizsgálatát egy nagysebességű CNC vezérlésű marógépen végezték el, száraz megmunkálással a melegalakító szerszámok ipari gyártási hagyományainak megfelelően. A marást egymással párhuzamos vonalak mentén végezték el, mely vonalak a felrakás irányára merőlegesek voltak. A forgácsolási paramétereket az alkalmazott szerszámok gyártói ajánlásai alapján választották meg, melyek rendre a következők voltak: nagyoló marást egy 16 mm átmérőjű, 3 mm-es éllekerekítésű toroid maróval végezték el – a megfelelő sík felület előállítás érdekében – 0,15 mm-es fogásmélységgel, 100 m/perc-es forgácsolási sebességgel, 0,2 mm/ford. –os előtolással. A nagyolást követte a simító marás, melyet egy 6 mm-es átmérőjű, két élű PVD bevonatolt, keményfém gömb végű maróval végezték el az alábbi technológiai paraméterekkel: 160 m/min-es forgácsolási sebesség, 0,08 mm/ford előtolás, 0,15 mm-es fogásmélység. A forgácsoló erőket egy piezoelektromos dinamóméterrel (Kistler type 9119AA2) rögzítették 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával. Minden mintadarab esetében 6 darab mérést hajtottak végre, melyekből később a normál és előtolási erő komponenseket határozták meg. [11]

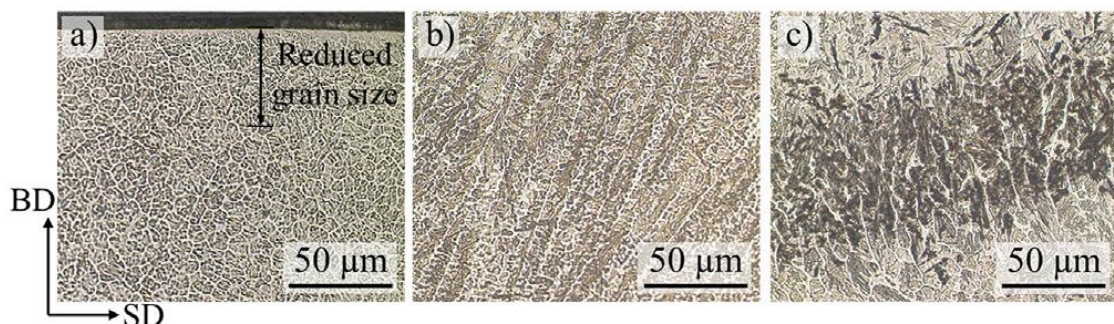
Metallográfiai vizsgálat céljából mintadarabok lettek készítve, mind a nyers gyártmányból, mind az utólag forgácsolt darabokból a lézer pásztázási irányának megfelelően (transzverzális, longitudinális és ortogonális). A darabokat beágyazták, csiszolták, polírozták és végül maratták. Optikai mikroszkóppal (Zeis Stemi 2000-C és Leica DMRE optikai mikroszkóp FEI QUANTA 450 digitális kamerával felszerelve) vizsgálták a darabok makroszerkezetét, mint például bevonat vastagsága. Pásztázó elektron mikroszkóppal vizsgálták a mikroszerkezetet. Az ötszörös nagyításban készült mikroszkópius képek szoftveres kiértékelésével határozták meg az adott darab porozitását. A mikrokeménységet 200 gf-es terheléssel Lietz Durimet mikrokeménységmérő gépen határozták meg ASTM E92-17-es szabvány szerint; minden egyes mintán 30 tetszőlegesen megválasztott pontban mérték a keménységet. A nyers és forgácsolt felületen topográfiai vizsgálatot végeztek el egy Sensofar PLU-Neox optikai berendezéssel ISO 25178 szabvány szerint. [11]

Minden vizsgált minta nagyfokú anizotrópiát mutatott. Makroszerkezetileg nagymértékű eltérések jellemezték a mintákat, függetlenül azok irányultságától. A rétegvastagág a lézersugár pásztázási sebességének növelésével csökkent, ezzel szemben a lézersugár teljesítményének növelése ellentétes hatást váltott ki, azonban kisebb mértékben. Nagyobb pásztázási sebesség mellett a lézersugár által a folyamatba bevitt energia mennyisége csökken, ezért a megolvadt fémpor mennyisége is csökken, vagyis a keletkező réteg vastagsága kisebb lesz. A por átlagos szemcseméretének növelése szintén a rétegvastagág csökkenését eredményezte. A nagyobb méretű pornak több időre van szüksége a teljes megolvadásra, míg a kisebb átlagos méret esetében ez az idő kisebb, így nagyobb mennyiségű por képes a teljes megolvadásra, ezáltal növelve az adott réteg vastagságát. A rétegvastagság változásában trendet figyeltek meg: az alaplaptól távolodva az egyes rétegek vastagsága fokozatosan növekedett. Az időben legkésőbb felvitt rétegek rendelkeztek mindig a legnagyobb vastagsággal, hiszen ezek az időben utolsó rétegek reprezentálják az ömledék tényleges magasságát. Az időben korábban lerakott rétegek vékonyabbak voltak, hiszen a lézersugár hatására az új réteg felvitelekor az előző réteg egy részének is újra ömledékbe kellett mennie. [11]



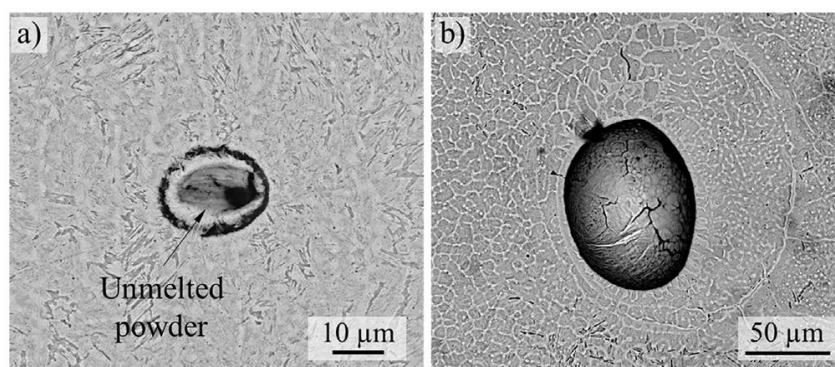
15. Ábra: A lézersugár pásztázási irányával transzverzális, ortogonális és longitudinális keresztmet-szetű minták mikroszkópos felvételei [11]

A longitudinális és transzverzális minták metallográfiai vizsgálata során több különböző mikroszerkezetet tudtak megkülönböztetni-lásd 15. Ábra. Ez alól kivételt képez az időben utolsóként felvitt réteg, melyben szépen elkülönülő poligonális-szerű szemcsék jöttek létre. Mélyebben fekvő rétegek összességében kétfajta szemcseszerkezetet tartalmaztak egymással keveredve: dendrites poligoniális-szerű – melyen szemcsék száma főleg egy réteg szélén domináns – és poligoniális-szerű – mely főleg az egymással fedésben lévő rétegekben jellemző. Ez a szemcseszerkezet tipikusnak nevezhető a lézersugaras bevonatolás esetében. Ennek oka, hogy a megszilárdulás során az ömledék-szilárd fázisok között különböző a hőmérséklet gradiens, valamint a megszilárdulási sebesség. Igazából az ömledékben a dendrites szerkezet magashőmérséklet gradiens esetében a hőmérséklet fluxus vektorral ellentétesen növekszik, az ömledék poligoniális szemcseszerkezettel fog megszilárdulni. Az időben legkésőbb felrakott réteg esetében az ömledék gyors megszilárdulásra volt képes a környezetével folytatott magas mértékű hőcsere miatt. Ezért a poligoniális szemcseszerkezet mennyisége a gyártott darab felszíne felé közeledve csökken a nagyobb hűlési sebesség miatt. Az egymást átfedő rétegekben megeresztett martenzit jelent meg. A pásztázás közben lézersugár által lefedett terület közepén a H13-as acélra jellemző tipikus szövetszerkezet alakult ki: A szemcsék széle ausztenitben gazdag, míg a szemcsék közepe martenzitet és maradék ausztenitet tartalmazott. [11]



16. Ábra: Lizzula, Sorgato és társaiknak mintáiról készült mikroszkópi felvételek. [11]

A pórusok többsége (kerek pórusok) a rétegek külső szélein helyezkedtek el. A pásztázási sebesség csökkentésével mind a pórusok mérete mind a pórusok száma jelentősen csökkent. A lézersugár teljesítménynek változtatása nem gyakorolt szignifikáns hatást a pórusok számára vagy méretére, azonban a legmagasabb használt lézersugár teljesítmény alacsony pásztázási sebességgel párosítva jelentősen csökkentette a pórusok számát. [11]



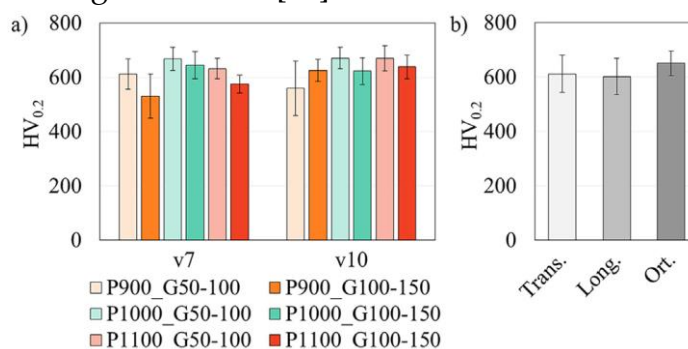
Kép 1: A lézersugaras bevonatolással gyártott H13-as acélban keletkező tipikus pórusok és az azokat körül ölelő mikroszerkezetről készült elektron mikroszkópos felvételek [11]

A bevonatolás során felvitt anyag keménysége növekedett, ha a pásztázási sebességet is növelték. Korlátozott növekedést figyeltek meg a felvitt anyag mikro keménységében közepes lézersugár teljesítmény mellett. Azonban elmondható, hogy a bevonatolás technológiai paramétereinek nincsen szignifikáns, jelentős mértékű hatása a gyártott anyag keménységére. [11]

Általánosságban megállapították [11], hogy a forgácsoló erő csökken a rétegek számának növelésével. Az átlagos felületi érdesség (R_a) a forgácsolt felületek esetében csökkent a rétegek számának növelésével. Nagyobb forgácsoló erők nagyobb hő keletkezéséhez vezettek, mely a felület reorinetációját akadályozta meg. [11]

Az alacsony rétegszám jobb bevonatolási minőséget eredményezett – kisebb mértékű porozitás és anyagszerkezettani hibák és nagyobb keménység-, azonban nehezebb forgácsolhatóságot – a forgácsolási erők megnövekedtek és a felület minősége romlott. [11]

A mintadarabok keménységének inhomogenitása a gyártott anyagban kialakuló magas keménységgel rendelkező sávok kialakulásával magyarázható. Ez vezetett a forgácsolt felület inhomogenitásához. [11]



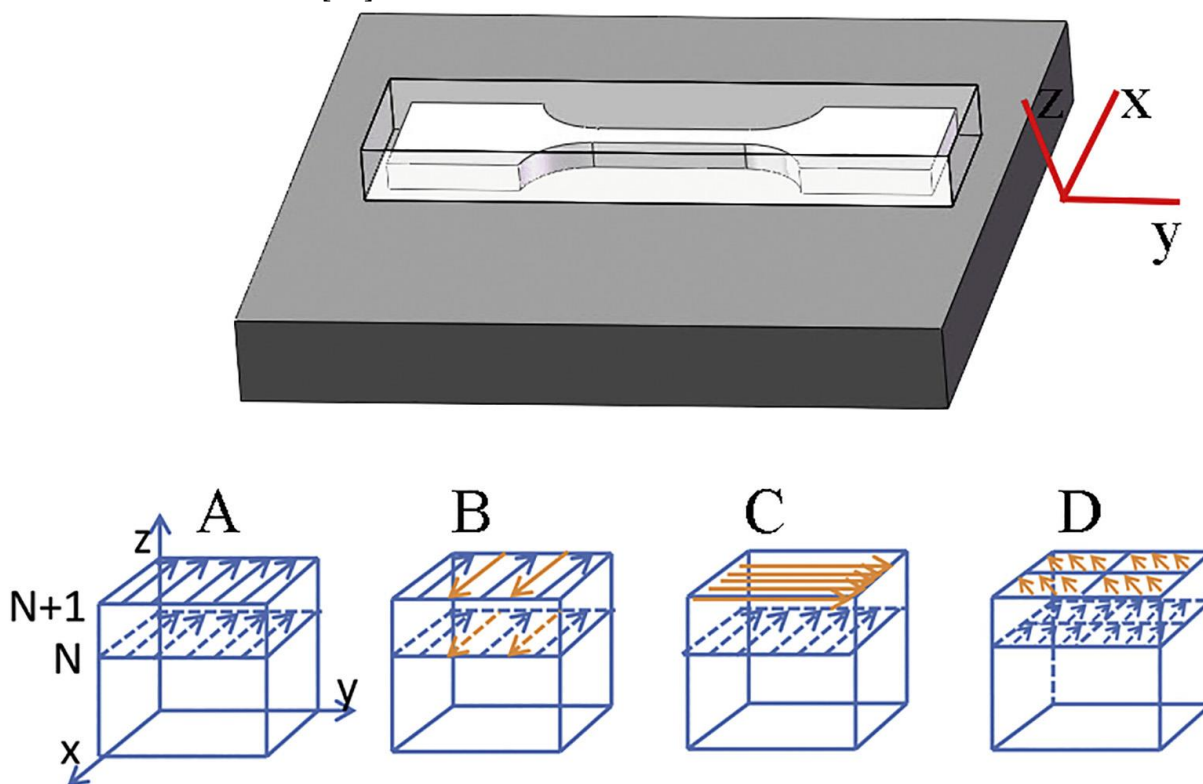
Ábra 17: A bevonatolás átlagos mikrokeménysége a különböző technológiai paraméterek esetén (a) és a különböző irányból kimunkált metalográfiai minták átlagos mikrokeménysége [11]

3. Táblázat: Lizzul, Sorgato és társaik által mért különböző felületi érdességek [11]

Cladding	Sa (μm)	Sku (–)	Ssk (–)	Spk (μm)	Svk (μm)	Sdr (%)
2 layers	1.88 ± 0.05	4.43 ± 0.35	1.11 ± 0.06	4.14 ± 0.03	0.76 ± 0.05	3.54 ± 0.10
3 layers	1.65 ± 0.04	2.92 ± 0.08	0.75 ± 0.03	2.82 ± 0.09	0.68 ± 0.04	3.22 ± 0.07
4 layers	1.41 ± 0.01	3.10 ± 0.13	0.64 ± 0.04	2.27 ± 0.09	0.90 ± 0.03	2.74 ± 0.12
5 layers	1.36 ± 0.02	3.28 ± 0.19	0.79 ± 0.07	2.54 ± 0.08	0.65 ± 0.04	2.34 ± 0.08

2.3.2. 15-5PH KORRÓZIÓÁLLÓ ACÉL

X.D. Long és X.L. Zhou [12] a lézersugaras bevonatolás során a pásztázási stratégia hatását vizsgálták a megszilárdulásra, a mikroszerkezetre és a mechanikai tulajdonságokra. Vizsgálataik során 4 féle pásztázási stratégiát alkalmaztak, melynek során 15-5PH korrózióálló acélt vittek fel 316L jelű acél felületére. A minták megfelelő előkészítése után pásztázó elektron mikroszkópos (SEM) és „Electron back-scatter diffraction” (EBSD) analízist végeztek el azokon, hogy az additív úton gyártott darabok szövet-szerkezetéről felvilágosítást kapjanak. A mintákat Yb-YAG típusú lézerrel Argon védőgáz jelenléte mellett – hogy az oxigén jelenlétének káros hatásait elkerüljék – gyártották. Az alkalmazott additív technológiai paraméterek rendre a következők voltak: rétegvastagság: $30\mu\text{m}$; 200W-os lézersugár teljesítmény; 900 mm/s-os pásztázási sebesség és $90\mu\text{m}$ -es vonalosztás. A Long és Zhou által alkalmazott pásztázási stratégiákat szemlélteti a 18. Ábra [12]

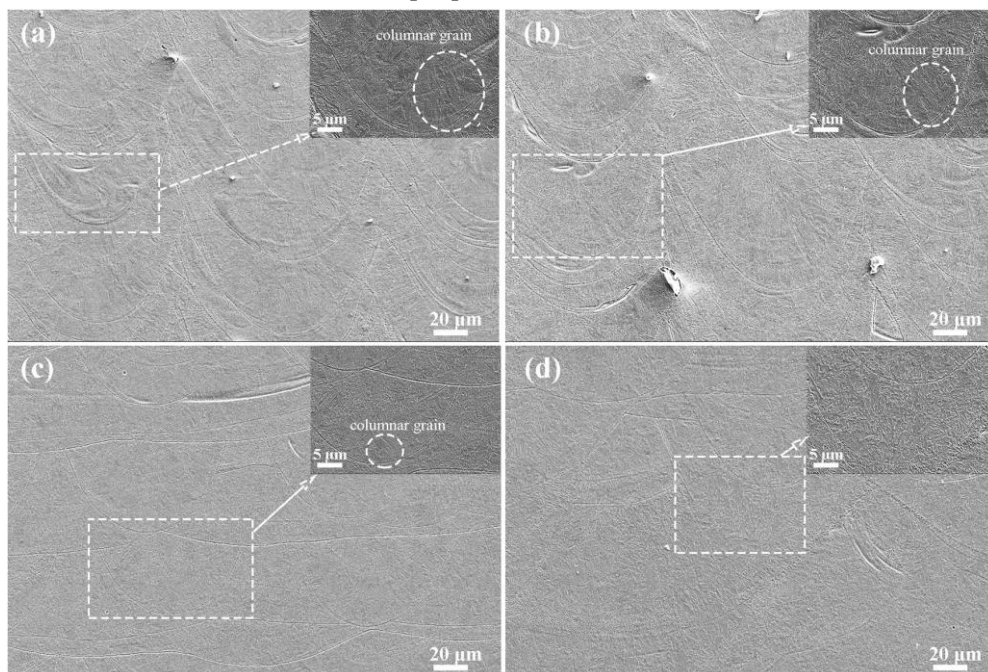


Ábra 18: Long és Zhou által alkalmazott pásztázási stratégiák [12]

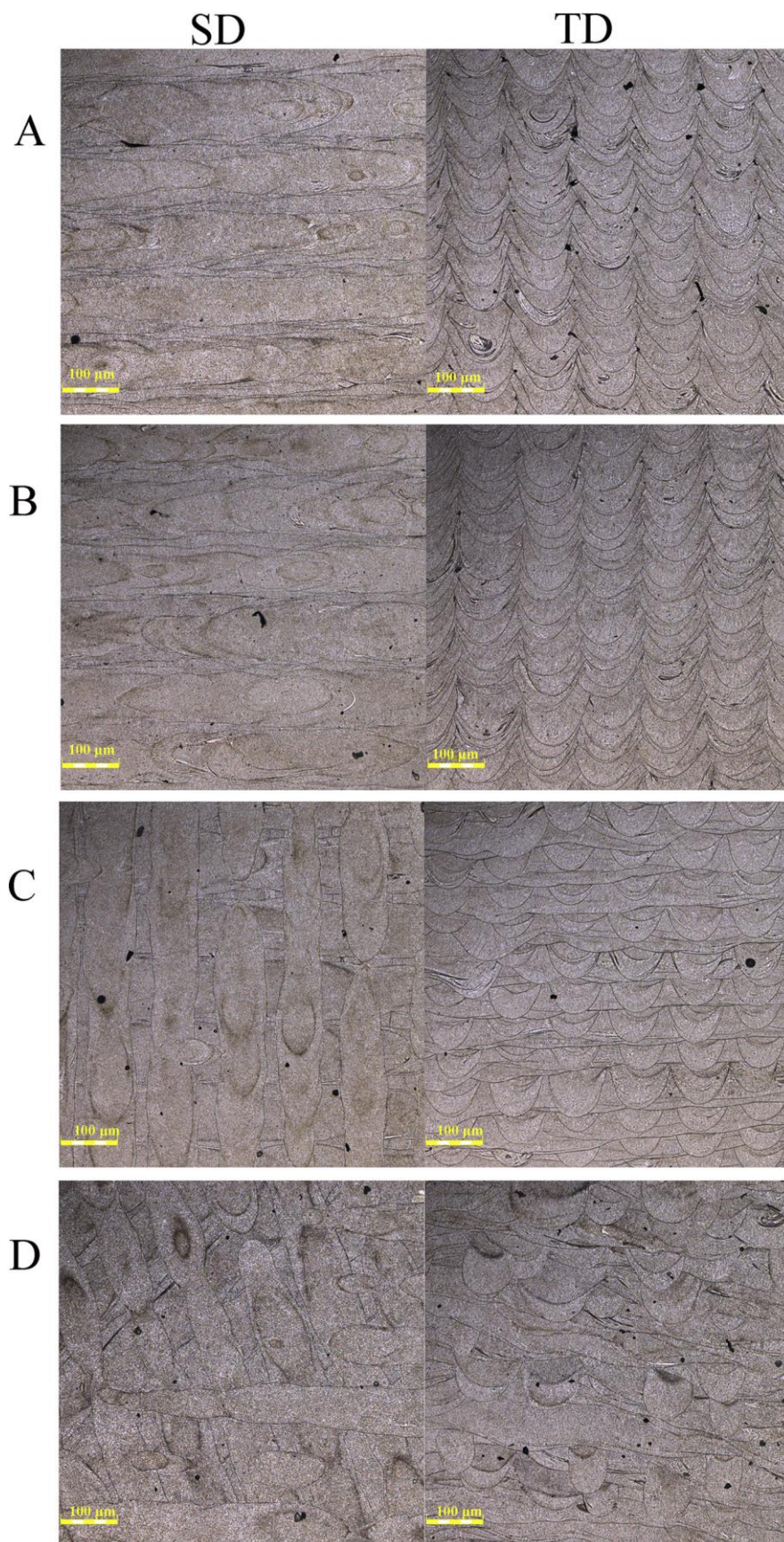
Az „A” jelű stratégia esetében végig egymással párhuzamosan egy pásztázási vektornak megfelelően kerültek fel az egyes rétegek. A „B” pásztázási stratégia esetében egymással párhuzamosan, de ellentétes irányú pásztázási vektorok mentén kerültek fel az egyes rétegek. A „C” jelű pásztázási stratégiai esetében egy rétegen belül egymással párhuzamos vonalak adták a pásztázási stratégiát. Azonban ezeket a vonalakat rétegenként a rétegsíkjában 90° -kal mindig elforgatták. Végül pedig a legbonyolultabb pásztázási stratégia a „D” jelű volt, melynek során $3 \times 3 \text{ mm}^2$ -es területű kis szigetek

gyártásából állították össze a végső próbatestet. Egy „szigeten” belül a pásztázási vektor megegyezett, azonban rétegenként az egyes szigeteket az előző réteghez képest mindig 67°-kal elforgatták. [12]

Az „A” jelű pásztázási stratégia eredményezte a legkisebb relatív sűrűséget 97,5%-ot, míg a „C” és „D” jelűek a legnagyobbat 99%-ot. Az „A” pásztázási stratégia által elért relatív kis sűrűséget az anyagon belüli nagyszámú gyártási hibával, például porozitással lehet magyarázni. A transzverzális keresztmetszetből vett mintákon hal-szálka alakú mintázat vehető ki, míg a longitudinális irányultságú mintákon egyértelműen a pásztázási iránynak megfelelő hosszú egyenes vonalak láthatók. Az ömledék mélysége nagyobb méretű, mint a gyártás során felvitt réteg magassága, ami ezen gyártástechnológiára jellemző a gyártás során ciklikusan ismétlődő újra melegítéssel magyarázható. Azonos pásztázási irány esetében („A” stratégia) keletkezett a legnagyobb méretű ömledék. A „B” stratégia esetében az ömledék mérete jó közelítéssel megegyezett az „A” stratégia során kapott ömledék méretével. Az egymáshoz képest 90°-kal elforgatott pásztázási irány esetében csökken az elnyelt hő mennyisége, így a keletkezett ömledék fürdő mennyisége is. A „D” pásztázási stratégia esetében sikerült a legkisebb ömledék méretet elérni. [12]



19. Ábra: Nong és Zhou által készített pásztázó elektron mikroszkópos felvételek a különböző pásztázási stratégiával készített darabokról. [12]



20. Ábra: A darabok makroszerkezete a pásztázási irány síkjában és arra merőlegesen a különböző stratégiák esetében [12]

A mikroszerkezetet tekintve főleg oszlopos és ekvixiális szemcséket figyeltek meg a mintákban, ahogy az a 12. Képen is jól kivehető. A hőhatás övezet határán nagyon finom szemcsék voltak jelen, míg az ömledék közepén durva oszlopos szerkezetű szemcsék. Az inhomogén mikroszerkezet a gyártás során a darabon belüli eltérő nagyságú hőmérséklet gradienssel és megszilárdulási aránnyal magyarázható. A szemcseszerkezetet tekintve az „A” pásztázási stratégia esetében durva, az ömledék közepén összekapcsolódó (mint a cipzár) szemcse szerkezetet lehetett megfigyelni, ehhez hasonló volt a „B” stratégia során keletkezett szövetszerkezet. A „C” és „D” esetében a forgatás gyorsabb hűlést tett lehetővé így finomabb szemcseszerkezet tudott létrejönni. Az additív úton gyártott anyagot tekintve martenizit alapon maradék ausztenit figyelhető meg. Ez eltér a „hagyományos” módon gyártott 15-5PH acél szövetszerkezetétől, hiszen ott ausztenitbe ágyazott martenizit figyelhető meg. Nong és Zhou a maradék auszteni arányát mérte a vizsgált darabokon. Az „A” jelű stratégiával készült darabban a maradék ausztenit aránya 2,57 % volt, a „B” jelű esetében 3,55 %, a „C” jelű esetében 4,59 %, míg a „D” jelű esetében 4,66 % volt. A maradék ausztenit jelenléte az úgy nevezett in situ hőkezelés eredménye: a gyártás folyamata során a technológia elvéből adódóan az anyag ciklusosan ismétlődő hőkezelésnek van kitéve. A maradék ausztenit főleg a szemcse határokon jelenik meg. „C” és „D” pásztázási stratégia esetében sok apró, finom szemcse keletkezett, vagyis a szemcsehatárok száma is több volt, mint „A” és „B” esetében. Ezért volt a maradék ausztenit mennyiség nagyobb „C” és „D” esetében. [12]

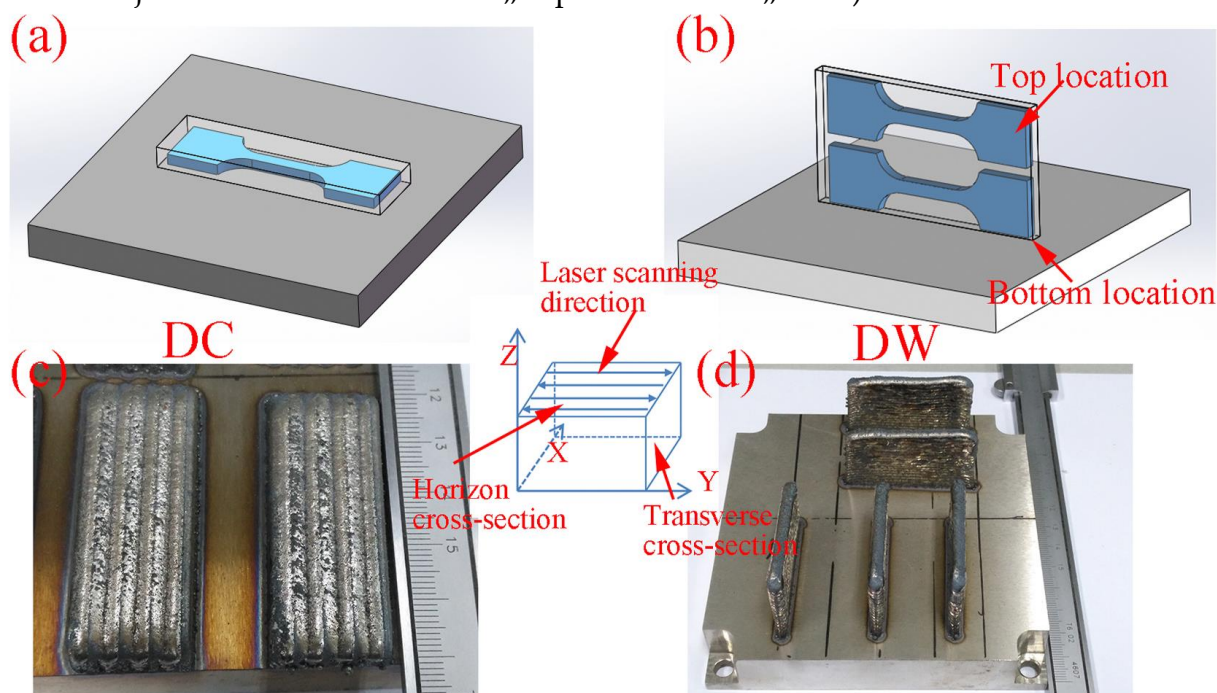
A mechanikai tulajdonságokat tekintve azok „A”-tól indulva „D”-ig növekedő tendenciát mutattak. Míg „A” esetében a folyáshatárt 808 ± 8 MPa-nak, a szakítószilárdságot 1145 ± 5 MPa-nak mérték, addig a „D” stratégia esetében 892 ± 8 MPa volt az additív úton gyártott anyag folyáshatára és 1191 ± 10 MPa volt a szakító szilárdsága. A szakadási nyúlás az első stratégia esetében 14,1%, míg az utolsó alkalmazott stratégia esetében 18,7% volt. Ezen eredmények alapján az alkalmazott pásztázási stratégia kulcs szerepet játszik nemcsak az additív úton gyártott darabban kialakult szövetszerkezetben, de a gyártott anyag mechanikai tulajdonságaira is komoly befolyással rendelkezik. Nong és Zhou megállapították, hogy a legjobb tulajdonságokkal a „D” jelű stratégiával nyomtatott darab rendelkezik, köszönhetően a kis szemcse méretnek, amely több maradék ausztenitet eredményezett, így javítva a darab mechanikai tulajdonságait.[12]

Nong, Zhou és társaik [13] vizsgálták továbbá a geometria hatását az additív úton gyártott termék minőségére 15-5PH korrózióálló acél esetében. Az alkalmazott fémpor mérete: 53 μ m - 150 μ m között mozgott; kémiai összetételét lásd. 4. Táblázat

4. Táblázat: Nong, Zhou és társaik által alkalmazott 15-5PH korrózió álló acél kémiai összetétele. [13]

Material	Fe	Cr	Ni	Cu	Nb	Mn	Si	C	N	O
Powder	bal.	14.2	4.6	3.7	0.35	0.89	0.71	0.03	0.058	0.03
DC	bal.	14.8	4.6	3.44	0.25	0.81	0.82	0.037	0.06	0.048
DW(Top)	bal.	14.7	4.7	3.63	0.31	0.89	0.93	0.053	0.061	0.041
DW(Bottom)	bal.	14.7	4.9	3.59	0.29	0.80	0.96	0.044	0.06	0.035

Kétféle geometriájú mintadarabot gyártottak: egy 50mm x 15mm x 5mm-es téglatesetet (Nong, Zhou és társaik által használt jelölése a mintadarabnak: „deposition cuboidW -„DC”) és egy 50mm x 3mm x 26mm-es falat (Nong, Zhou és társaik által használt jelölése a mintadarabnak: „deposition wall” „DW”) – lásd.



21. Ábra: : Nong, Zhou és társaik által alkalmazott pásztázási stratégia (középen), a gyártmányok és szakító próbatestek elrendezése (a-b) CAD programban és a ténylegesen legyártott mintadarabok (c-d) [13]

A mintadarabok gyártásához egy három tengely mentén vezérelhető berendezést használtak, koaxiális fúvókával folyamatos üzem módú diódlézerrel. A por folyamatos táplálását egy disk-rendszerű adagoló berendezéssel biztosították Argont használva vivő gázként. Továbbá Argon volt a védőgáz is. Az alkalmazott additív gyártástechnológiai paraméterek a 5. Táblázatban láthatók.

5. Táblázat: Nong, Zhou és társaik által alkalmazott additív gyártástechnológiai paraméterek [13]

Material and process parameters	Value
Laser power (W)	1600
Scan speed (mm/s)	6
Hatch increment (mm)	1
Layer increment (mm)	0.8
Powder feed rate (g/min)	12
Gas flow (L/min)	15
Laser spot diameter (mm)	2

A bizonyos mintadarabokat hőkezelték 1040 C°-on 30 percig, majd 482 C°-on öregítették őket egy órán keresztül. A gyártott darabokból később szakító próbatestek lettek kimunkálva, illetve csiszolatok készültek belőlük. A próbatesteken pásztázó elektron mikroszkópos analízist (SEM) is elvégeztek. A polírozott csiszolatok felületét Vilella régenssel maratták meg. : Nong, Zhou és társaik keménység mérést is végre hajtottak 200 grammos terheléssel és 10 másodperces „dwell time”-al. [13]

6. Táblázat: Nong, Zhou és társaik által mért mechanikai tulajdonságok átlagos értékei és szórása a különböző próbatestetek esetében. [13]

Geometry	Processing	Distance from baseplate	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ef (%)
DC	As-deposited	–	563 ± 9	1105 ± 5	13.4 ± 1
DW	As-deposited	bottom	726 ± 18	1067 ± 13	10.1 ± 0.3
DW	As-deposited	top	685 ± 25	1047 ± 17	9.6 ± 0.6
DC	Heat-treated	–	1233 ± 3	1364 ± 3	9.4 ± 0.2
DW	Heat-treated	bottom	1225 ± 7	1355 ± 5	11.2 ± 0.8
DW	Heat-treated	top	1200 ± 10	1324 ± 9	10.1 ± 0.3
Wrought	Heat-treated	–	1170–1300	1290–1400	10-15 [54]

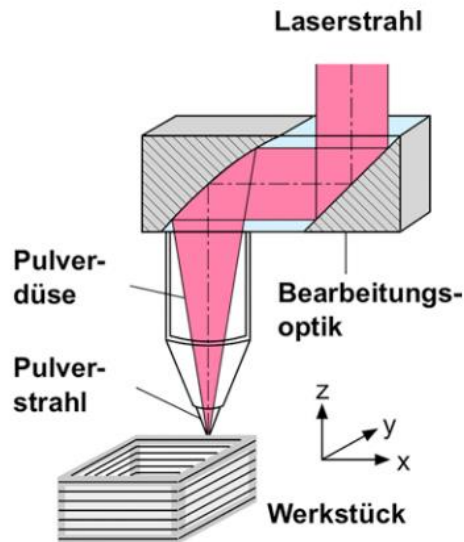
7. Táblázat: Nong, Zhou és társaik által mért keménység értékek átlaga és szórása a különböző mintadarabok esetében. [13]

Material	Microhardness (HV)	Transverse
	Horizon	
DC As-deposited	348.7 ± 15	371.4 ± 11
DC HT	505.1 ± 10	510.6 ± 14
DW As-deposited-top	355.7 ± 13	363.4 ± 11
DW As-deposited-bottom	369.4 ± 12	378.9 ± 9
DW HT top	475.3 ± 11	479.0 ± 7
DW HT bottom	499.8 ± 9	505.3 ± 10

Nong, Zhou és társaik a vizsgálataik alapján kijelentették, hogy az alkalmazott fém-por nagy Hidrogén tartalma miatt és a finom szemcseszerkezet alapján maradék ausztenit van jelen az általuk vizsgált mintadarabokban. Természetesen a maradék ausztenit mennyiségének mértéke függött az adott mintadarab hőkezeltségi állapotától, a mintadarab geometriájától és az alkalmazott pásztázási stratégiától. A maradék ausztenit befolyásolta a gyártott darabok mechanikai tulajdonságait és keménységét – lásd. 6. és 7. Táblázat. Megfigyelhető, hogy ezen értékek függenek mintadarabok gyártmányon belüli elhelyezkedésétől. Nong, Zhou és társaik megállapították, hogy a nagyobb magasságból kimunkált mintadaraboknak nagyobb a keménysége és kisebb a folyáshatára-szakító szilárdsága. A lecsökkentett hűlési aránnyal és megnövelt csúcs hőmérséklettel a szemcsék durvábbakká váltak, ez a magyarázata annak, hogy a darab alsó részén nagyobbak a mechanikai mérőszámok, mint a felsőbb területeken. A téglatestből kimunkált próbatest szakítóvizsgálata esetében 556 MPa volt a folyáshatár és 1105 MPa volt a szakító szilárdság. Az előbbi értéke alacsonyabb, míg az utóbbi magasabb, mint a falból kimunkált próbatest szakítóvizsgálatának esetében, ahol a folyáshatár 726 MPa, míg a szakító szilárdság 1067 MPa volt. Ez a téglatest geometriájú darabban található nagyobb mennyiségű maradék ausztenittel magyarázható. A maradék ausztenit mennyiségét drasztikusan le tudták csökkenteni a hőkezelés alkalmazásával. Megállapították, hogy a hőkezelt darabok durvább szemcséket tartalmaztak, de homogénebb volt a szövetszerkezetük, mint a „nyers”, hőkezeletlen daraboknak. Azonban így a durva szemcse szerkezet a gyártmányok felsőbb rétegeiben alacsonyabb mechanikai mérőszámokat eredményezett, mint az alsóbb rétegekben. [13]

2.4. Alkalmazott additív technológia

Az általunk alkalmazott eljárást, ami a port egy fúvófejen keresztül közvetlenül a lézersugár által létrehozott olvadékba juttatja, és így a kívánt anyagot létrehozza, Lézeres Generálásnak vagy porárammal történő lézeres bevonatolásnak is lehet nevezni. [3]



Ábra 22: Koaxiális kialakítású por felvitel (14)

Az alkalmazott technológiánál a por felvitele szabadon programozható speciális kialakítású fejjel történik – lásd Ábra 22. -, ami úgy van kialakítva, hogy a felvitt anyagot lézersugár segítségével rögtön megolvasztja. Az anyag megszilárdulásával létrejön egy újabb réteg, a keletkezett hő pedig a már meglévő munkadarabon keresztül kerül elvezetésre. [14]

Ennél a technológiánál az alkalmazott por lehet kerámia vagy fém. A technológia egy lépcsős rendszerként dolgozik, utólagos hőkezelés lehetséges, sőt bizonyos esetekben szükséges. A port inertgáz (legtöbbször argon) mellett egy speciális kialakítású fúvókán keresztül célzottan juttatják a megmunkálás helyére. A háromdimenziós darab a rétegek egymás alá és mellé fektetésével jön létre. [14]

2.5. LRS EVO Diodeline

„A DIODE LINE termékvonallal az OR LASER a dióda gerjesztésű lézeres anyagmegmunkálással egy új területére lép. Az új lézerforrás számos előnnyel rendelkezik a hagyományos, villanólámpás rendszerekkel összevetve. A hosszú élettartamon és a kompakt kialakításon túl jelentős előny a 15-szörös hatásfok! Az energiahatékonyságot jól mutatja, hogy a rendszer üzemeltetéséhez mindössze egy egyfázisú, 230V/16A, hagyományos áramforrásra van szükség. Mivel a gépben nincsenek kopó alkatrészek, így gyakorlatilag karbantartásmentesen üzemeltethető. A gép hatékonysága többek között a rendkívül stabil lézernyalábnak is köszönhető, még 50 μm méret esetén is. A lézerrendszer képes akár 3 kW-os csúcsteljesítmény leadására, 0.1 ms-tól 50 ms-ig terjedő impulzus hosszal, 0.1-100 Hz frekvencia mellett.” [15]



Ábra 23: LRS EVO DiodeLINE típusú lézersugaras hegesztő berendezés [15] (ballra) és üzemküzben a Csepeli Szerszámgépgyár csarnokában (jobbra)

„Az új lézerfej kialakításnak köszönhetően különböző, más-más fókusztávolságú lencsék alkalmazása is lehetséges. A fókusztávolság minden egyes lencsében elektronikus van tárolva, így a lézerrendszer automatikusan felismeri a használt értéket és vissza is jelzi a kezelőpanelen. Az alkalmazott lencsétől függően a lézernyaláb vastagsága egy elektro-mechanikus nyaláb növelővel folyamatosan állítható. Az LRS EVO továbbfejlesztett lézerrendszerrel rendelkezik, így széleskörűen alkalmazható mind a szerszámgépgyártásban, mind pedig egyéb iparágakban. Az intuitív üzemeltetés gyors és hatékony felhasználást biztosít. A géppel kis és közepes méretű szerszámok és részegységek munkálthatók meg, legyen szó akár egyszerűbb, akár komplex műveletekről. A tervezés során nagy hangsúlyt fektettek a felhasználóbarát, kényelmes, és egyúttal költséghatékony kialakításra is.” [15] A gép paramétereit az alábbi táblázat foglalja össze:

8. Táblázat: ND:YAG villanólámpás lézer és az LRS EVO DIODELINE típusú lézer összehasonlítása
[15]

	Sztenderd forrás (ND:YAG villanólámpa)	DIODE LINE (dióda gerjesztésű)
Teljesítmény (impulzus)	akár 300 W	akár 300 W
Teljesítmény (folyamatos)	–	250 W
Hatásfok	kb. 3 %	> 20 %
Hálózati csatlakozás	400 V / 16A / 3 fázis	230 V / 16A / 1 fázis
Legnagyobb energia felhasználás	15 kW	3 kW
Legnagyobb impulzus hossz	20 ms	50 ms
Legnagyobb impulzus frekvencia	20 Hz	100 Hz

Itt meg kell jegyzem, hogy a Csepeli Szerszámgépgyár által üzemben tartott lézerhegesztő berendezés paraméterei eltérnek a forgalmazó által a berendezéshez csatolt gépkönyvben szereplő peremétektől.

3. TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

3.1. *Additív gyártási technológia esetén*

3.1.1. KÍSÉRLETI TERV FELÁLLÍTÁSA

Összeségében az alábbi paramétereket kellett meghatároznom:

- lézer teljesítménye
- lézersugár átmérője a fókuszpontban
- a lézersugárral felvitt egy réteg vastagsága
- a lézersugárral felhordott anyag egy vonalának szélessége
- a lézersugárral felvitt egymás melletti vonalak átfedésének nagysága
- a hegesztő fej sebessége a gyártás során

Az additív technológiákról általánosságban elmondható, hogy a szélesebb körű ipari alkalmazásuk csak az utóbbi évtizedben kezdődött el. Az additív technológiák jelenleg is a gépipari kutatások és fejlesztések középpontjában vannak. Ennél az oknál fogva még nem áll rendelkezésre nagyobb mennyiségű szakirodalom a technológiai paraméterekről. Jelenleg a mérnökök a különböző alkatrészek additív gyártása során a technológiai paramétereket a rendelkezésre álló kis mennyiségű szakirodalom (melynek mértéke folyamatosan dinamikusan növekszik), az additív gyártáshoz alkalmazott anyag gyártójának ajánlásai és empirikus tapasztalatok alapján határozzák meg. Mivel csak korlátozott számban állnak rendelkezésre források, ezért ezeket a paramétereket tapasztalati úton voltam kénytelenek meghatározni. Itt kiindulási alapul szolgáltak a berendezésen a Wigner Jenő Fizikai Kutató Intézet munkatársainak korábbi tapasztalatai. Céлом azon paraméter együttes megállapítása volt, melyekkel az általam elvárt geometriai pontosság elérhető. A geometriát kielégítőnek ítélem, ha a méretei az előírt méreteket egy megfelelő tűrésmezővel túllépik, így a jövőben végzendő forgácsolási műveleteknek biztosan megfelelő mértékű ráhagyása lesz. Meg kell jegyeznem, hogy ezzel a technológiával durva felületi minőség érhető el, így például egy szerszám javítása során vagy egy tengely bevonatolásakor minden féleképpen szükséges a készre munkálás valamilyen forgácsolási technológia alkalmazásával. Mindig nyers / nem előkészített felületre készültek a darabok. Ennek oka a következő: amennyiben lehetségesnek ítéli a cég vezetése az automatizált sorozatgyártást, nem célja a felület előkészítést is, mint önálló lépést beilleszteni a műveleti láncba.

Vizsgálataim során két féle fémport alkalmaztam: az Oerlikon GmbH által gyártott 15-5PH korrózióálló martenzites acél, mely az AMS5659-el egyezik meg, illetve az AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacélt, mely az ISO szabvány szerinti X40CrMoV5-1-1-nek (1.2344) felel meg. Az alkalmazott fémporok adatlapjait a 8.1. és 8.2.-es Mellékletekben csatolom. Mivel elegendő mennyiségben az utóbbi fémpor állt

rendelkezésre, ezért a forgácsolhatósági vizsgálatokat csak ezen fémporból készült próbatesteken tudtam elvégezni. A bevonatok alaplapjának DC03-as típusú acéllemez választottam, mivel ez állt a legnagyobb mennyiségben rendelkezésre a Csepeli Szerszámgépgyárban.

A vizsgált geometriák bonyolultságát fokozatosan növeltem, az egyszerűbb geometriáktól haladtam a bonyolultabbak felé. Elsőként csak vékonyan (1mm vastagon) vittem fel H13-as fémport DC03-as (nyers) lemezfelületre. 10 mm×10 mm× 1mm-es téglatestek kerültek előállításra lényegében. Az alkalmazott additív technológiai paramétereket a 7.5. Mellékletben csatolom. A gyártás során a mindig két adott technológiai paraméter volt változtatva egymás függvényében, rendre:

- Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége (Kód: PV-__ -H13)
- Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban (Kód: PD-__ -H13)
- Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága (Kód: PLH-__ -H13)
- Lézersugár teljesítménye – Átfedés nagysága (Kód: PLD-__ -H13)

Majd 10 mm×10 mm×5 mm-es téglatestek kerültek előállításra immáron 15-5PH és H13-as acélból is. Az alkalmazott additív technológiai paramétereket a 7.4. és 7.6. Mellékletben csatolom. A gyártás során a mindig két adott technológiai paraméter volt változtatva egymás függvényében, rendre:

- Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége (Kód: PV-__ -H13 vagy PV-__ -15-5PH)
- Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban (Kód: PD-__ -H13 vagy PV-__ -15-5PH)
- Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága (Kód: PLH-__ -H13 vagy PV-__ -15-5PH)
- Lézersugár teljesítménye – Átfedés nagysága (Kód: PLD-__ -H13 vagy PV-__ -15-5PH)

Ez utóbbit csak a H13-as melegalakító szerszámacélnál végeztem el, ugyanis azt tapasztaltam, hogy a H13-as felhasználási területéből adódóan nehezebben nyomtatható, mint a 15-5PH, így a megfelelő geometria, különösen az elvárt 5mm-es magasság elérésének érdekében szükség volt további paraméterek változtatására. A mérések és a megfelelő következtetések levonása után további próba testek kerültek legyártásra, míg a kívánt magasságot a megfelelő mértékben meg nem haladtam.

A szakirodalom [9,12] alapján a pásztázási stratégiának minden estében a 18. Ábrán látható „C” jelű megoldást választottam, azzal a különbséggel, hogy a felrakott réteg után az adott mintadarab kontúrja is legyártásra kerül.

3.1.2. MINTADARABOK GYÁRTÁSA SZÖVETSZERKEZET ANALÍZIS ELVÉGZÉSÉHEZ

A szövetszerkezet elemzésének céljából AISI H13-as fémpont használva DC03-as lemezre 10 mm×10 mm×1 mm-es mintadarabokat készítettem a rendelkezésre álló hegesztő berendezéssel. Az azonosítás érdekében a hegesztő berendezéssel az adott próbatest csoport kódját is „felírtam” a lemezre. Az alkalmazott technológiai paramétereket a 7.5. Mellékletben csatolom. Az elkészült mintadarabok a 24.-27. Képeken láthatók.



24. Ábra: Próba bevonatolások melyek a Lézersugár teljesítményének és a Hegesztőfej sebességének változtatásával készültek.



25. Ábra: Próba bevonatolások melyek a Lézersugár teljesítményének és a lézersugár átmérőjének változtatásával készültek.



26. Ábra: Próba bevonatolások melyek a Lézersugár teljesítményének és a rétegvastagság átmérőjének változtatásával készültek.



27. Ábra: Próbadarabok, melyek a lézersugár teljesítményének és az átfedés változtatásával készültek H13-as acélból

Ezekből a mintadarabokból is csiszolatokat majd mikroszkopikus felvételeket készítettem, melyeken az egyes rétegeknek a geometriai tulajdonságait vizsgáltam.

3.1.3. PRÓBAGYÁRTÁSOK EREDMÉNYEI ADDITÍV TECHNOLOGIAI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSHOZ.

Jelen esetben mindig az adott mintadarab magasságát vizsgáltam. Az elért magasságokat a 7.7. Mellékletben csatolom.

3.1.3.1. *Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál*

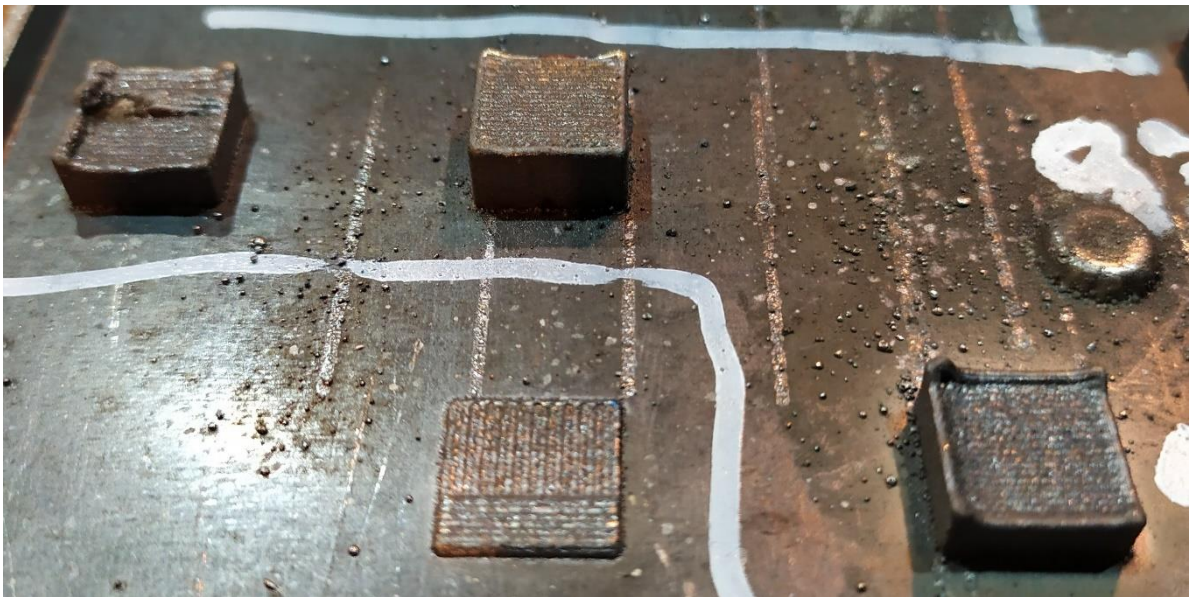
Ennél a kísérletnél a korábbi tapasztalatok és a szakirodalom alapján a lézersugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50 %; 65 %; 80 % volt, míg a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebessége rendre 5 mm/s; 10mm/s; 15mm/s; volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebességének csökkentésével nő. A túlzottan nagy – jelen esetben 15 mm/s – sebességénél a fej mozgása túl gyors, ezért kevés idő áll a fémpor rendelkezésére, hogy az olvadékba jusson, vagyis kevés fémpor jut az olvadékba, tehát a rétegek nem tudnak rendesen kialakulni és nem történik rétegeképződés. Túl alacsony sebesség és túl magas lézersugár teljesítmény esetén a darab jelentősen – esetenként több milliméterrel is - túllépi, az előírt magasságot. lásd.: 28. Ábra



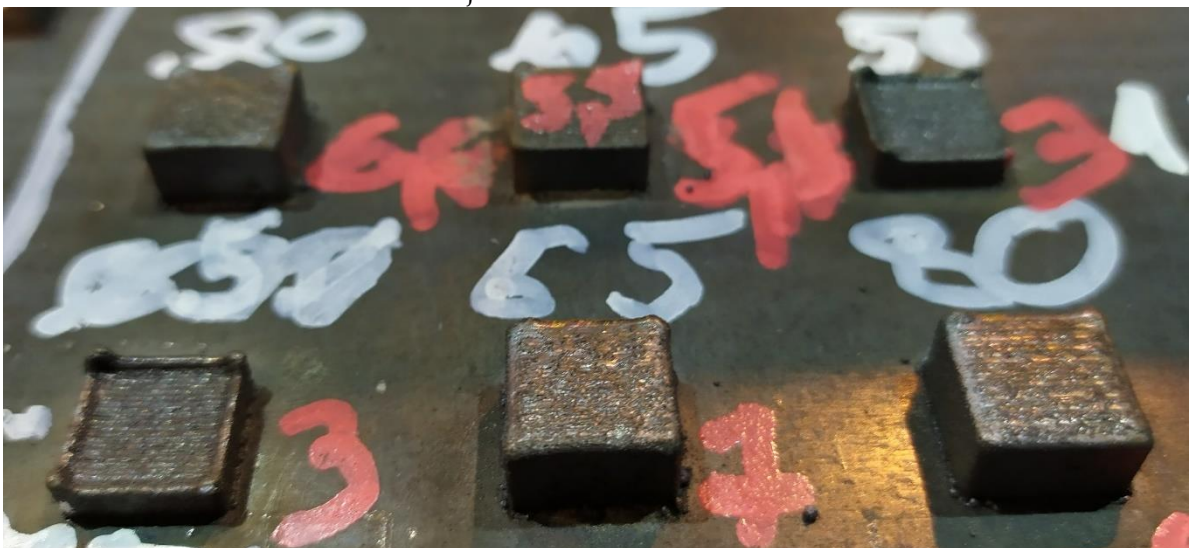
28. Ábra: 15-5PH korrózióálló acél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és a pásztázási sebesség változtatásával készülnek

3.1.3.2. Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál

Ennél a lézersugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50%; 65%; 80% volt, míg a lézersugár átmérője a fókuszpontban rendre 0,74mm; 1,24mm; 1,5mm volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a lézersugár átmérőjének a csökkentésével nő, azonban ez csak egy bizonyos átmérőig igaz. Ugyanis, ha túl kicsi az átmérő kis területen tudja a lézer az alapanyagot megolvasztani, ezért a rétegek vékonyak és inhomogének lesznek – lásd.: 29. és 30. Ábra



29. Ábra: 15-5PH korrózióálló acél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és a lézersugár átmérőjének változtatásával készültek



30. Ábra: 15-5PH korrózióálló acél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és átmérőjének változtatásával készültek

3.1.3.3. Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága 15-5PH anyagnál additív technológia alkalmazásánál

Ennél a vizsgálatnál a lézersugár teljesítménye a maximálisához képest rendre 50 %; 65 %; 80 % volt, míg az egyes rétegek vastagsága rendre 100 μm ; 200 μm ; 400 μm volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a rétegvastagság csökkentésével nő. Adott pásztázási sebesség mellett a réteg vastagság csökkentésével a gyártási idő jelentős mértékben nő, így a gazdaságosság érdekében nem célszerű túlzottan vékony rétegekkel dolgozni. Túlzottan vastag rétegek esetén nem tudnak a rétegek rendesen kialakulni, így a darab magassága sem lesz megfelelő. Rétegről rétegre egyre kevesebb por jut az olvadékba,

így a fej és a darab közti távolság -melynek állandónak kellene lennie a folyamat során-, növekszik. Ezt szemlélteti a 31. Ábra

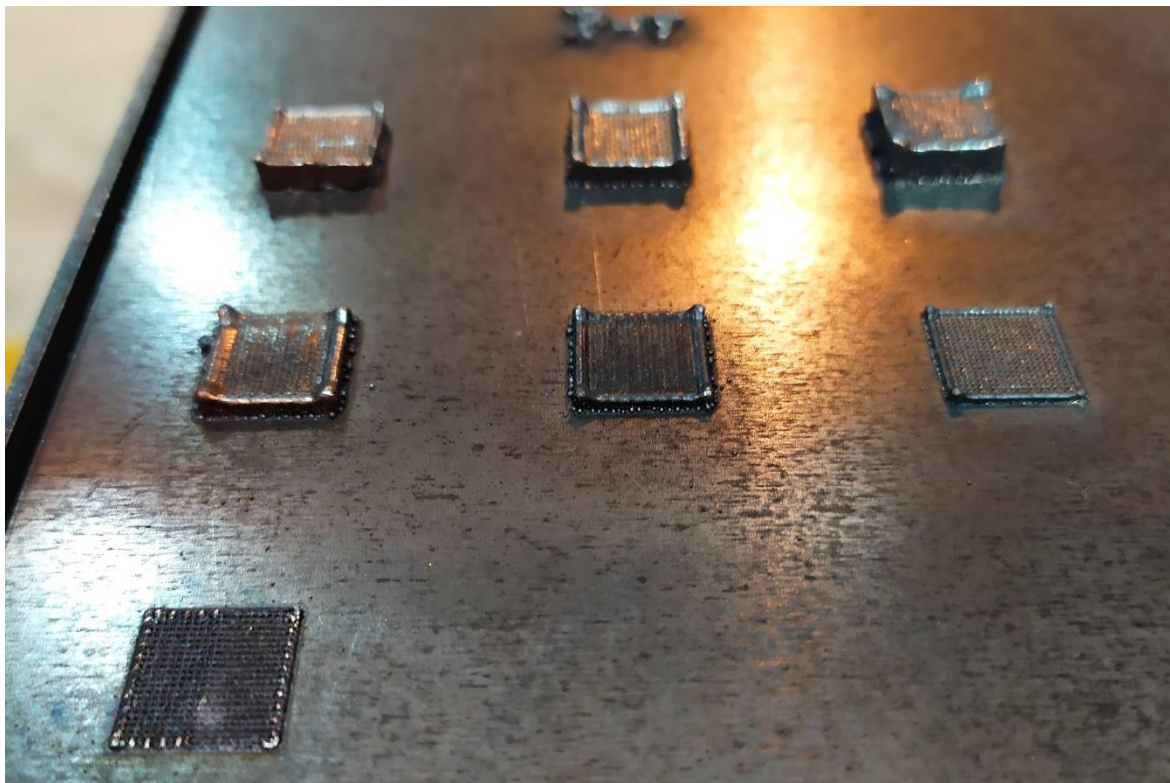


31. Ábra: 15-5PH korrózióálló acél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és rétegvastagság változtatásával készülnek

3.1.3.4. Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál

Ennél a kísérletnél a korábbi tapasztalatok és a szakirodalom alapján a lézer sugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50 %; 65 %; 80 % volt, míg a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebessége rendre 5 mm/s; 10mm/s; 15mm/s; volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebességének csökkentésével nő. A túlzottan nagy – jelen esetben 15 mm/s – sebességénél a fej mozgása túl gyors, ezért kevés idő áll a fémpor rendelkezésére, hogy az olvadékba jusson, vagyis

kevés fémpor jut az olvadékba, tehát a rétegek nem tudnak rendesen kialakulni és nem történik rétegeképződés. Túl alacsony sebesség és túl nagy lézersugár teljesítmény esetén a darab jelentősen túllépi az előírt magasságot. A 15-5PH martenzites korrózióállóacélhoz képest a H13-as szerszámacélból készült darabok magassága kisebb ugyanazon technológiai paraméterek mellett – lásd. 32. Ábra.



32. Ábra: H13 szerszámacél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és a pásztázási sebesség változtatásával készülnek

3.1.3.5. Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál

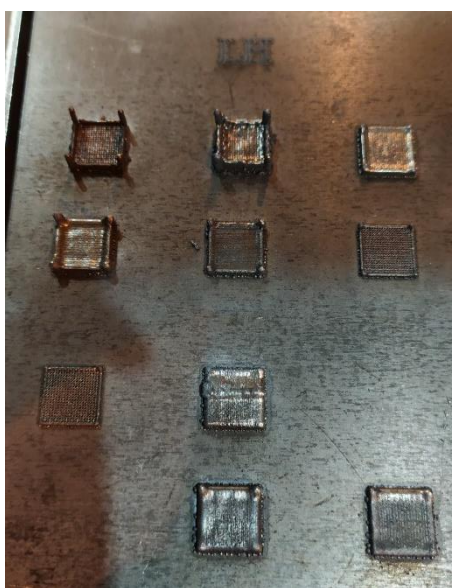
Ennél a lézersugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50 %; 65 %; 80 % volt, míg a lézersugár átmérője a fókuszpontban rendre 0,74 mm; 1,24 mm; 1,5 mm volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a lézersugár átmérőjének a csökkentésével nő, azonban ez csak egy bizonyos átmérőig igaz. Ugyanis, ha túl kicsi az átmérő kis területen tudja a lézer az alapanyagot megolvasztani, ezért a rétegek vékonyak és inhomogének lesznek – lásd 33. Ábra. A 15-5PH martenzites korrózióállóacélhoz képest a H13-as szerszámacélból készült darabok magassága kisebb ugyanazon technológiai paraméterek mellett.



33. Ábra: H13 szerszámacél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és a lézersugár átmérőjének változtatásával készülnek

3.1.3.6. Lézersugár teljesítménye – Nyomatási réteg vastagsága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál

Ennél a vizsgálatnál a lézersugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50 %; 65 %; 80% volt, míg az egyes rétegek vastagsága rendre 100 μm ; 200 μm ; 400 μm volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a rétegvastagság csökkentésével nő. Adott pásztázási sebesség mellett a rétegvastagság csökkentésével a gyártási idő jelentős mértékben nő, így a gazdaságosság érdekében nem célszerű túlzottan vékony rétegekkel dolgozni. Túlzottan vastag rétegek esetén nem tudnak a rétegek rendesen kialakulni, így a darab magassága sem lesz megfelelő. Rétegről rétegre egyre kevesebb por jut az olvadékba, így a fej és a darab közti távolság, -melynek állandónak kellene lennie a folyamat során- növekszik. A 15-5PH martenzites korrózió állóacélhoz képest a H13-as szerszámacélból készült darabok magassága kisebb ugyanazon technológiai paraméterek mellett.



34. Ábra: H13 szerszámacél próbatestek, melyek a lézersugár teljesítményének és rétegvastagság változtatásával készülnek

3.1.3.7. Lézersugár teljesítménye – Átfedés nagysága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál

A H13 nagy hővel szembeni ellenállása miatt szükségessé vált a vonalak közti lépésköz változtatásának vizsgálata is. Ekkor már a H13-as porból kevés állt a rendelkezésemre, így gazdaságossági okokból a téglatestek magasságát 3 mm-re csökkentettem. Ezekkel a mintadarabokkal egyszerre vizsgáltam az additív gyártás és a bevonatolás paramétereit is. Ennél a vizsgálatnál a lézersugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 60 %; 75 %; 90 % volt, míg az A vonal egymáshoz képesti átfedése rendre 40%; 50 %; 60 % volt. Szemrevételezés alapján megállapítottam, hogy az anyag magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a vonal átfedésének a növelésével nő. A magasság ezzel a megoldással nagymértékben növelhető, azonban a gyártási idő is megnövekszik. Túlzottan nagy átfedés esetén a darab magassága jelentősen meghaladja az előírtat, gyakran több milliméterrel is – lásd. 34. Ábra

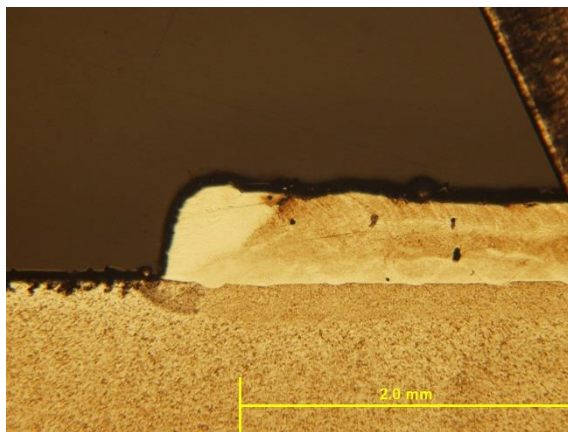


35. Ábra: Mintadarabok, melyek a lézersugár teljesítményének és a átfedés változtatásával készültek H13-as acélból

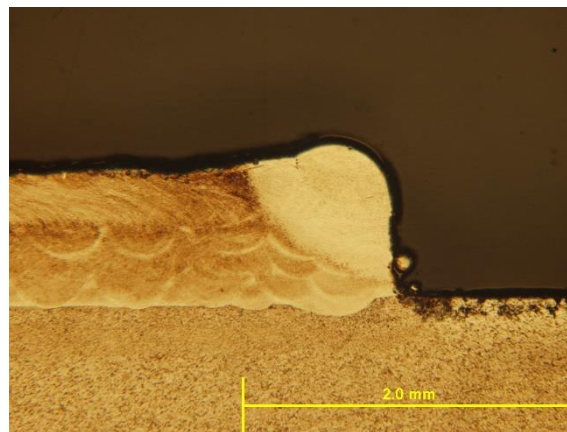
3.1.4. ANYAGVIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A szövetszerkezet elemzése céljából gyártott mintadarabokat beágyaztam, csiszoltam, políroztam végül pedig Vilella régenssel marattam a felületüket.

A csiszolatokról készült képek alapján egyértelműen kijelenthetem, hogy a lézersugár teljesítményének növelésével – a többi vizsgált paraméter változtatása nélkül - a gyártott darabok magassága is nő, ahogy az a 36. és 37. Ábrán látszik. Ez megfelel a szakirodalomnak [2], melynek erre a témára vonatkozó részét a 2.2.2.1. fejezetben elemeztem és amiben részletesen tárgyalásra került e jelenség magyarázata.

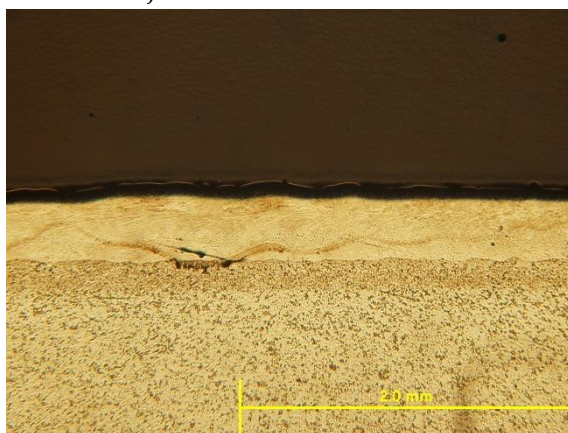


36. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-D-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=225\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=0,74\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=200\text{ }\mu\text{m}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)

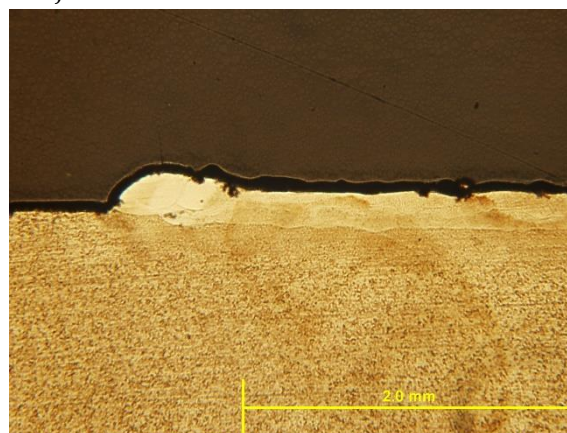


37. Ábra: : Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-D-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=0,74\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=200\text{ }\mu\text{m}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)

Megállapítottam, hogy a pásztázási sebesség növelésével - a többi általam vizsgált paraméter változtatása nélkül - csökken a mintadarabok magassága. Ezen a jelenségre szolgálnak jó például a 38. és 39. Ábrák. Ez egybe vág a korábban általam elemzett szakirodalom [2] megállapításával, melyen könyvben a magyarázatot a szerzők részletesen kifejtik. Ezen szakirodalmat a 2.2.2.2. Fejezetben elemeztem részletesen.



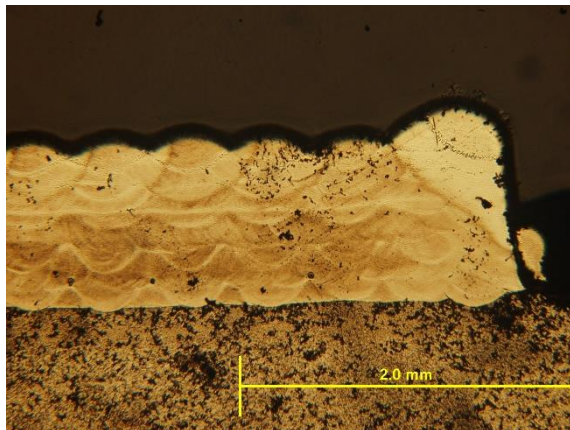
38. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-V-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=225\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=1,04\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=300\text{ }\mu\text{m}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)



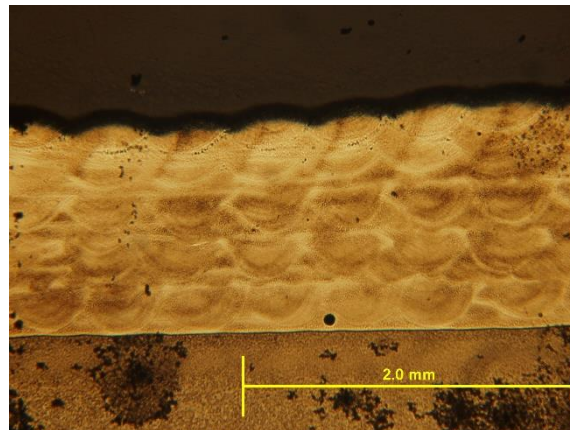
39. Ábra Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-V-4-H13; Lézersugár teljesítmény $P=225\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=10\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=1,04\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=300\text{ }\mu\text{m}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)

A rétegvastagság növelésével értelem szerűen nő a gyártott mintadarabok magassága, azonban csak egy bizonyos értékig. Ugyanis egy bizonyos rétegmagassági érték fölött - természetesen ez érték függ a többi alkalmazott additív technológiai paramétertől - nem megfelelő ömledék alakul ki, melynek mérete a rétegvastagság növelése mellett csökken. Ezért a rétegek egymásra építése során, - mivel rétegről rétegre csökken az egyes réteg vastagsága-, a gyártott darab felülete és a szórófej közötti távolság

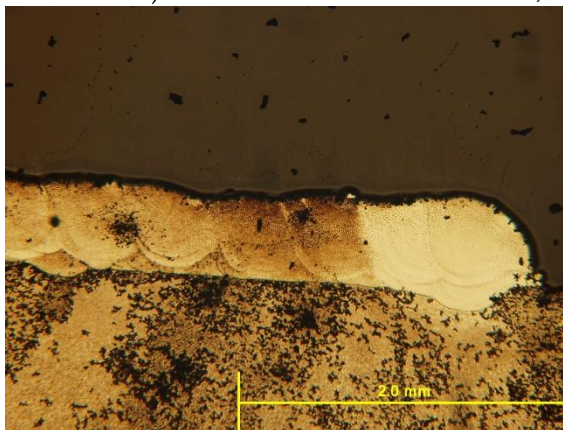
csökken. Ez kerülendő, ugyanis ekkor a lézersugár átmérője folyamatosan változni fog. Illetve bizonyos darab felület – szórófej távolság fölött réteg felrakás nem történik, hiszen a lézersugár fókuszpontja a darab felületén kívülre kerül, így nem olvasztja meg az alapanyagot.



40. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-LH-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=225$ W; pásztázási sebesség $v=10$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,04$ mm; Rétegvastagság $LH=100$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

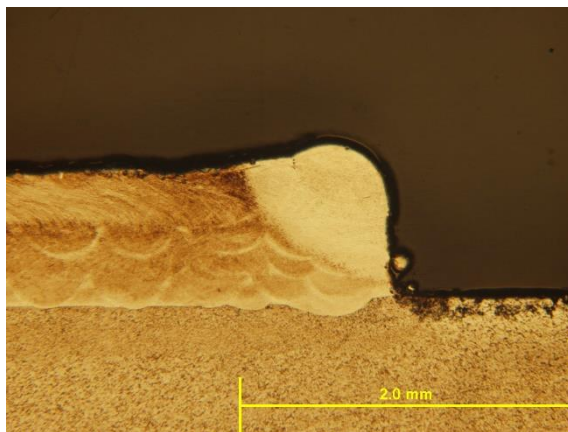


41. Ábra: : Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-LH-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=10$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,04$ mm; Rétegvastagság $LH=100$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

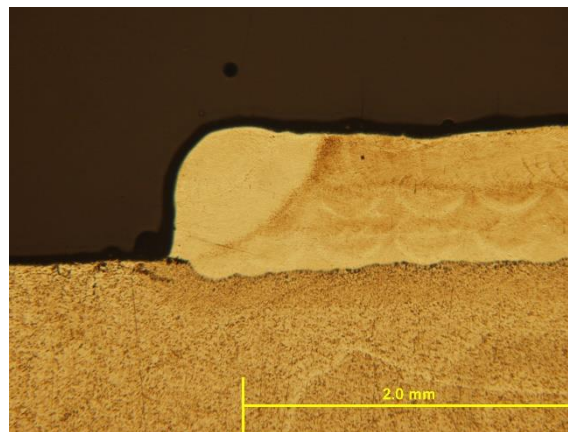


42. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-LH-9-H13; Lézersugár teljesítmény $P=360$ W; pásztázási sebesség $v=10$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,04$ mm; Rétegvastagság $LH=400$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

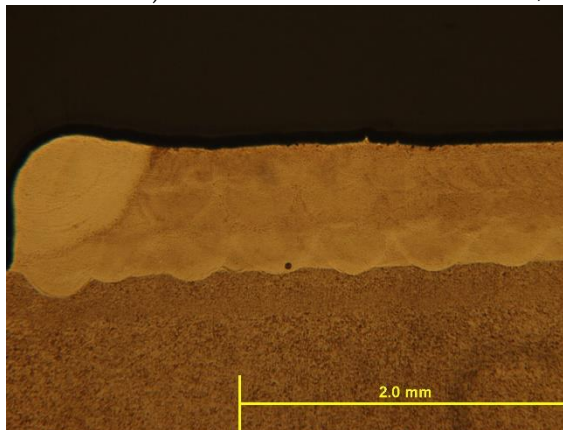
A lézersugár átmérőjének a megválasztása kritikus, azonban ezt a többi additív technológiai paraméterhez képest kell véleményem szerint megtenni. A készült mikroszkópi felvételek alapján kijelenthetem, hogy adott technológiai paraméterek mellett létezik egy optimális lézersugár átmérő, mellyel a lehető legnagyobb és állandó rétegvastagságot tudjuk elérni.



43. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-D-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

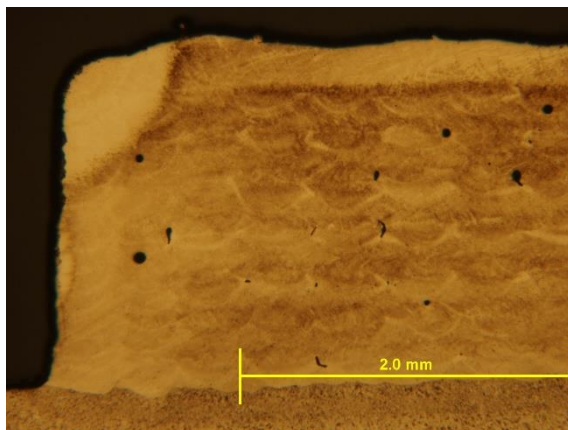


44. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-D-5-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,25$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

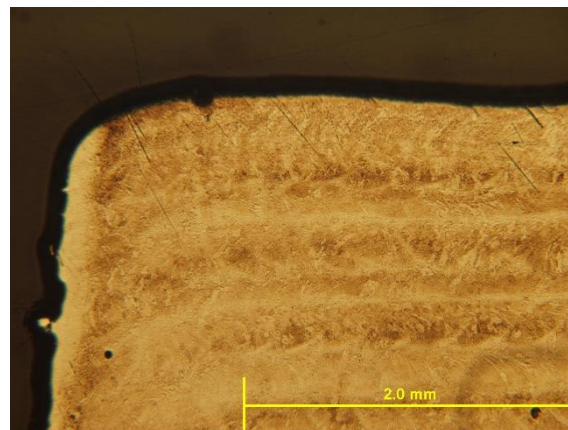


45. Ábra: : Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel(Kód: P-D-8-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,5$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

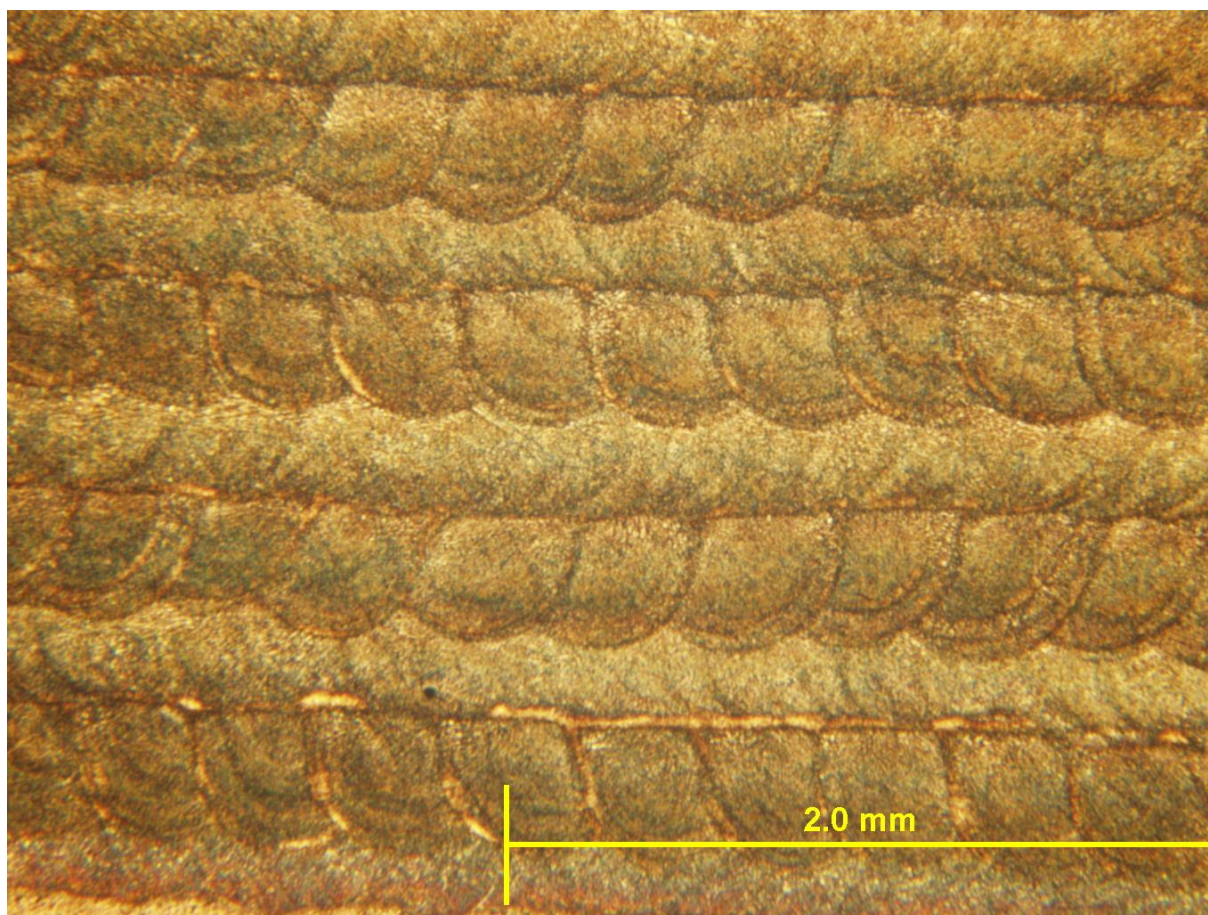
Az utolsó általam vizsgált additív gyártástechnológiai paraméter az úgynevezett átfedési arány(angolul: „overlap”). Ezen fogalmat a 2.2.2.3.-as fejezetben a [2] szakirodalom alapján már kifejtettem. Tapasztalataim szerint az AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél esetében e paraméter volt a legnagyobb hatással a gyártott mintadarab magasságára és tömörségére. Mint egy 10 %-al megnövelve az átfedési arányt már jelentős mintadarab magasság növekedést sikerült elérnem, ahogy az a 46. és 47. Ábrákon jól látszik.



46. Ábra: Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)



47. Ábra: : Lézersugárral bevonatolt próbatestről készült mikroszkópi felvétel (Kód: P-LD-7-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=60$ %)

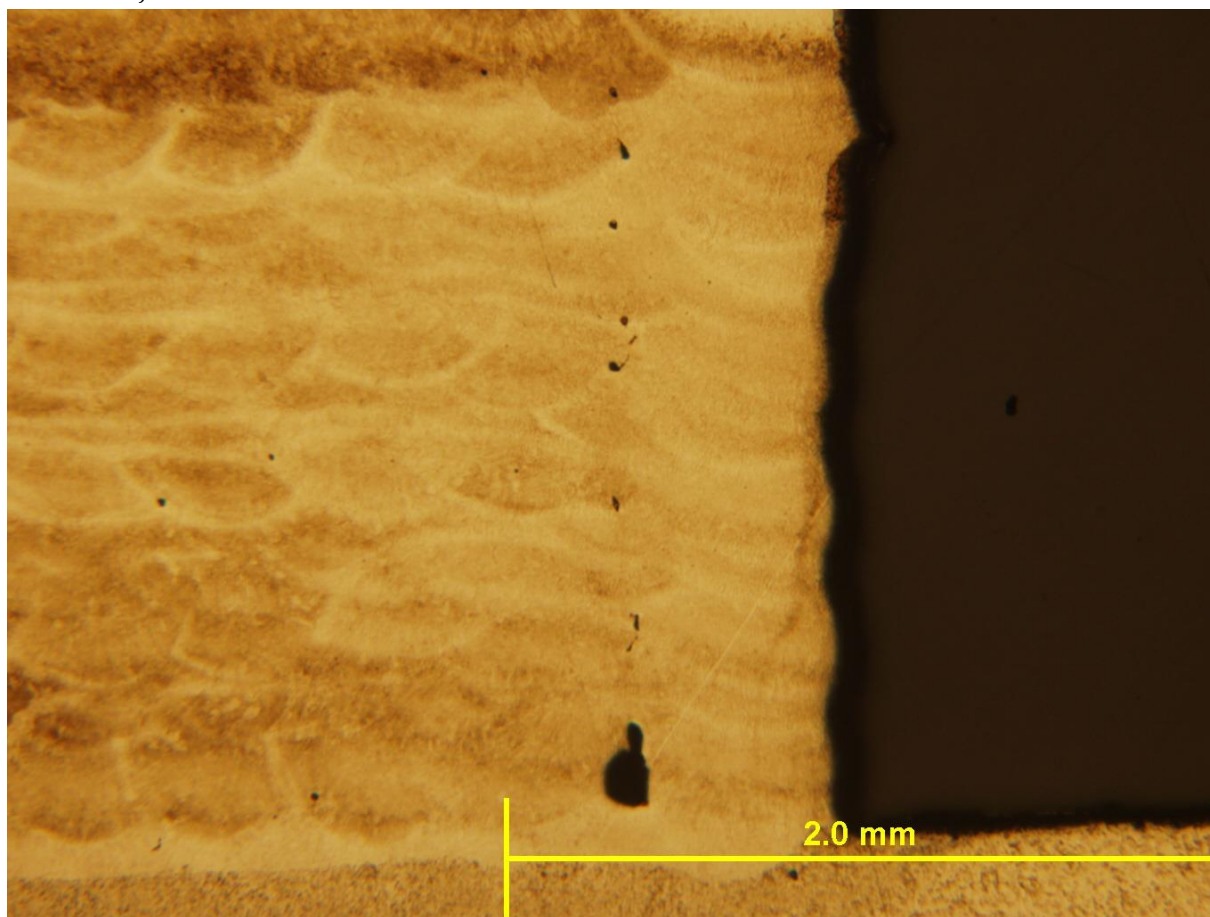


48. Ábra: Lézersugaras bevonatolásra jellemző tipikus szövetszerkezet (Kód: P-LD-9-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=60$ %)

A 48. Ábrán látható a lézersugaras bevonatolásra jellemző tipikus szövetszerkezet. A 18. Ábrán látható „C” stratégiának megfelelően az első rétegnél a pásztázási irányra

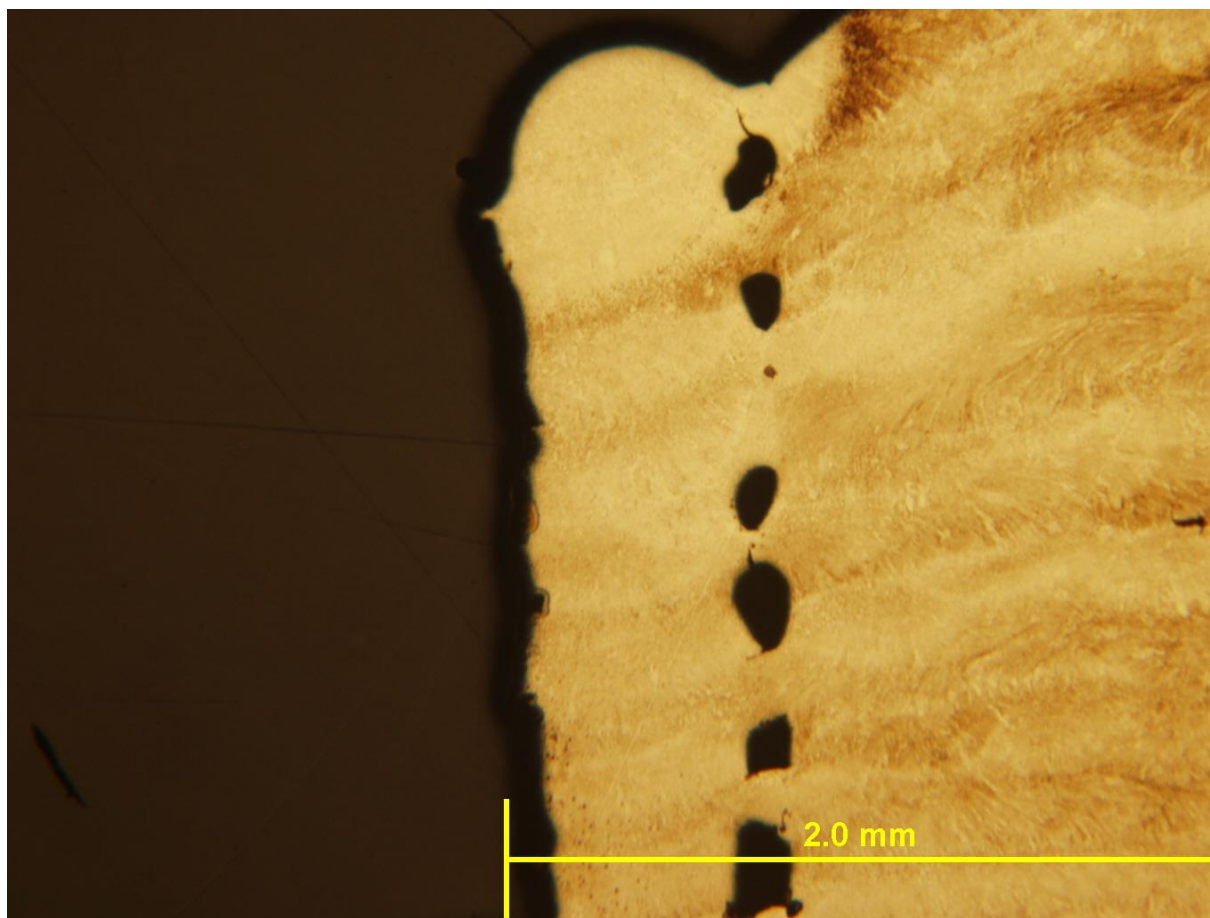
párhuzamosan, majd a következő rétegnél a pásztázási irányra merőlegesen (az alkalmazott stratégiának megfelelően ez periodikusan ismétlődik) helyezkedik el a csiszolat síkja. Ezért az egyes pásztázási vonalak / varratok a pásztázás síkjára merőlegesen és párhuzamosan is elmetzésre kerültek és jól látszik a megszilárdult makroszerkezet, ami leginkább a halak pikkelyéhez hasonlítható. A 48. Ábrán jól lehet látni, hogy az egyes felvitt rétegek nagy magassággal rendelkeznek, ezzel magyarázható, hogy a P-LD-9-H13-as kódú mintadarab elért magassága (3,7 mm) jóval meghaladta a cél magasságot (1,6 mm). Ezért a 48. Ábrán látható megszilárdult ömledék méret kerülendő.

Megfelelő (3,3 mm –es) magasságot sikerült elérni a P-LD-2-H13-as kódú próbatest esetében, ezen mintadarab csiszolatáról készült mikroszkópi kép látható a 49. Ábrán. Jól látható, hogy ebben az esetben a megszilárdult ömledék magassága sokkal kisebb, így a rétegek vastagsága is csökkent a 48. Ábrán szereplő mintadarabhoz képest. Ezek alapján kijelentem, hogy a 49. Ábrán látható megszilárdult ömledék méret és alak az ideális, a jövőben ehhez hasonló ömledék elérésére kell törekedni.



49. Ábra: Lézersugaras bevonatolásra jellemző tipikus szövetszerkezet (Kód: P-LD-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=337,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)

A 49. Ábrán megfigyelhető a kontúr és a test közötti jól kivehető porozitás jelenléte. Ezen porozitás még markánsabban kivehető a mintadarab másik oldalán, melyről készült mikroszkopikus kép az 50. Ábrán látható.

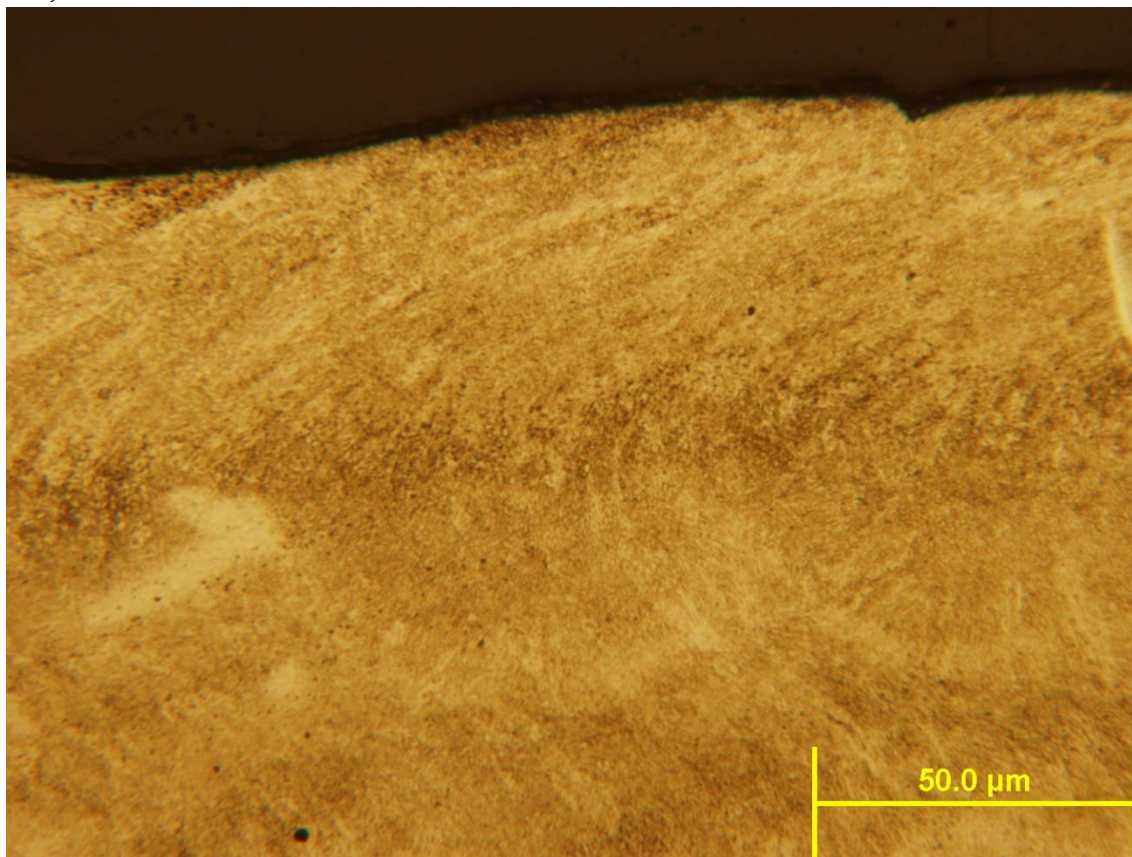


50. Ábra: Lézersugaras bevonatolás esetében a kontúr és az alaptest között megfigyelhető jelentős mértékű porozitás. (Kód: P-LD-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=337,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm ; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)

A 49. és 50. Ábrákon látható kialakult porozitás oka, hogy a kontúr és az alaptest között nem tudott megfelelő kohéziós kapcsolat kialakulni. Ennek több oka is lehet. Például a CAM programban meghatározott kontúr és alaptest közötti úgynevezett „offset” távolság értéke túl nagy a többi additív technológiai paraméter mellett. Továbbá a kontúrt képző ömledék keresztmetszetének értéke túlságosan alacsony -ennek okozója lehet a túl alacsony lézersugár teljesítmény, a túl nagy pásztázási sebesség vagy a túl nagy lézersugár átmérő. Ilyen esetekben a gyártás során a kontúr ömledéke túlságosan távol került az alaptesttől és nem volt képes megfelelő kohézió létrehozására, így alakulhattak ki a 49. és 50. Ábrákon látható egymás alatt egy vonalban megtalálható pórusok. Ezen kialakult pórusoknak később a forgácsoló erők elemzésekor még jelentősége lesz.

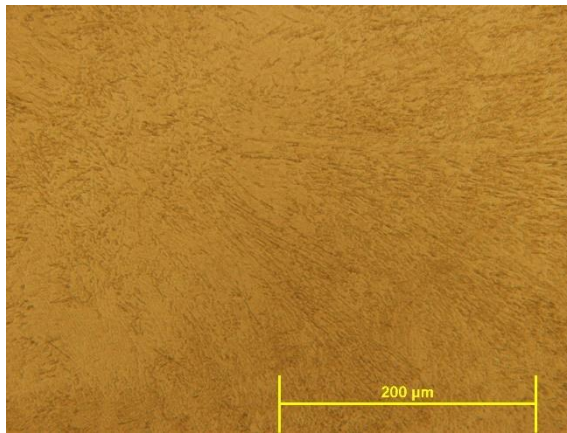
Az egyes felvitt rétegek egyes pásztázott vonalának megszilárdult ömledékének szubszemcse szerkezetét tekintve (az alkalmazott additív technológia lényegében felrakó hegesztés, mely egy hagyományos hegesztési eljárásához, mint például fogyó-elektrodás védőgázos ívhegesztés, képest sokkal kisebb mérettartományban használ-

ható ,ezért tartom relevánsnak a szubszemcse szerkezet tárgyalását) a mikroszkópi felvételek alapján kijelenthetem, hogy az ömledék jelen esetben cellásan kristályosodott ki, ez jól látható az 51. Ábrán.

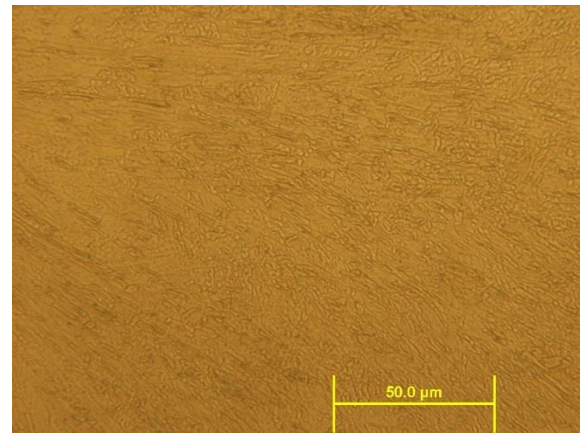


51. Ábra: Kikristályosodott cellás szubszemcse szerkezet. (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)

A 51. Ábrán - mely a pásztázási iránnyal párhuzamos síkban lévő metszete a ömledéknek - jól látható, hogy a szemcsék az ömledék keveredése után megszilárdult tartományban a pásztázási irány felé elhajolva növekedtek. Az 52. és 53. Ábrák -melyek a pásztázási iránnyal merőleges síkban lévő metszetei az ömledékeknek – is jól szemléltetik a cellás kristályosodást. „A szemcsék oszlopos (sugaras) elrendeződése annak a következménye, hogy a kristályosodás a megolvadási határra merőlegesen, a maximális hőmérséklet-gradiens irányában a leggyorsabb. Azok a szemcsék fognak gyorsabban növekedni, amelyekre nézve a maximális hőmérséklet-gradiens egybe (vagy közel) esik az ún. könnyű növekedési irányok valamelyikével (kőbös kristályokban ezek az elemi cellák $\langle 100 \rangle$ élei.” [8]

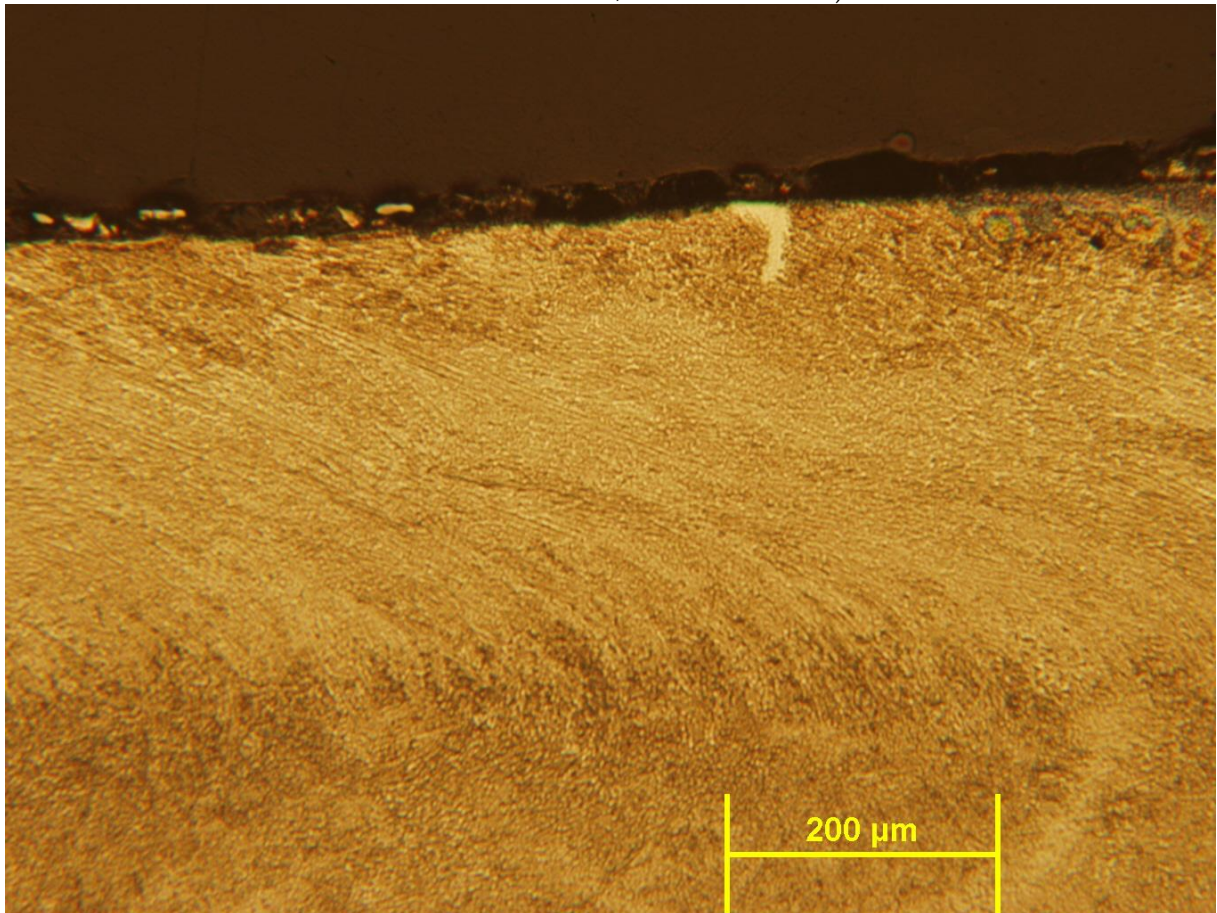


a)



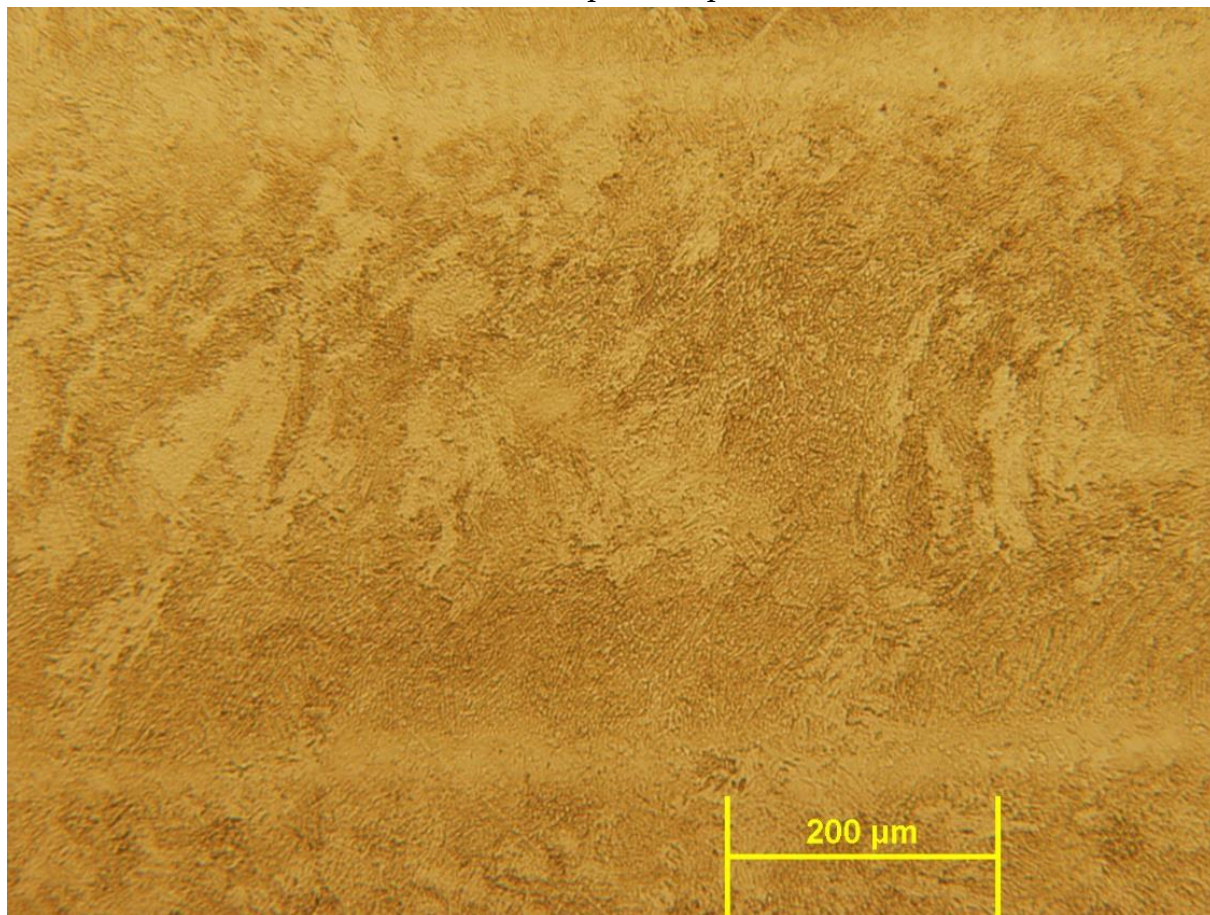
b)

52. Ábra: Kristályosodás a pásztázási irányra merőlegesen elmetezett ömledékben- annak közepén (a) és az ömledék keveredése után megszilárdult tartományban (Kód: P-D-9-H13; Lézersugár teljesítmény $P=360$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,5$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)



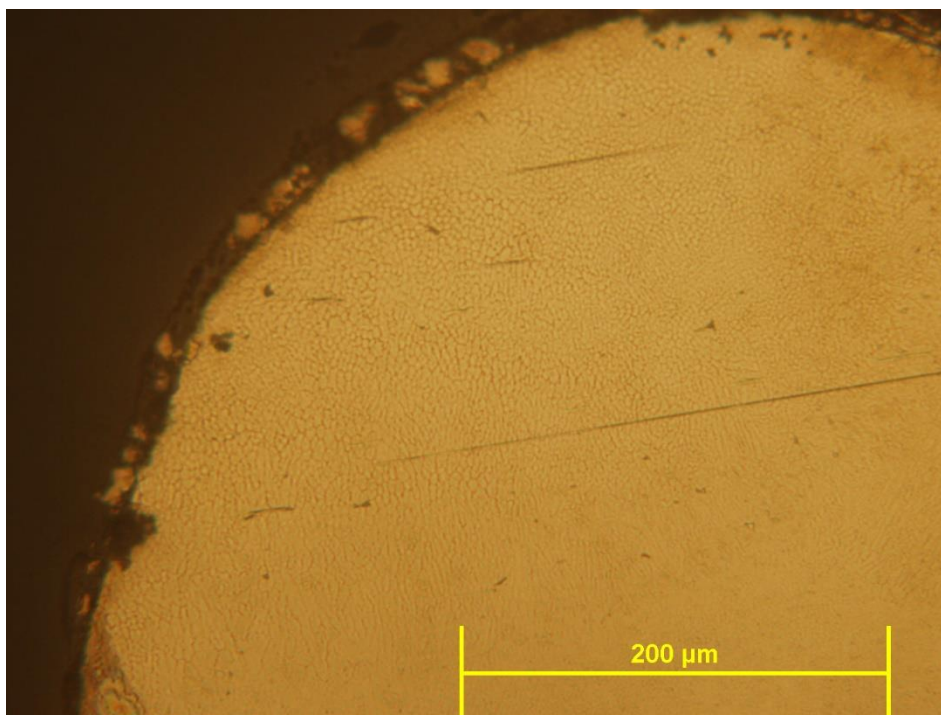
53. Ábra: Kristályosodás a pásztázási irányra párhuzamosan elmetezett ömledékben (Kód: P-D-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

Megállapítható, hogy –a technológiára jellemzően [16] – durva szemcsék keletkeztek, melyek mérete nagy szórást mutat. A nagyméretű szemcsékre példa a P-LD-7-H13-as mintadarabról készült mikroszkopikus kép – lásd.: 54. Ábra



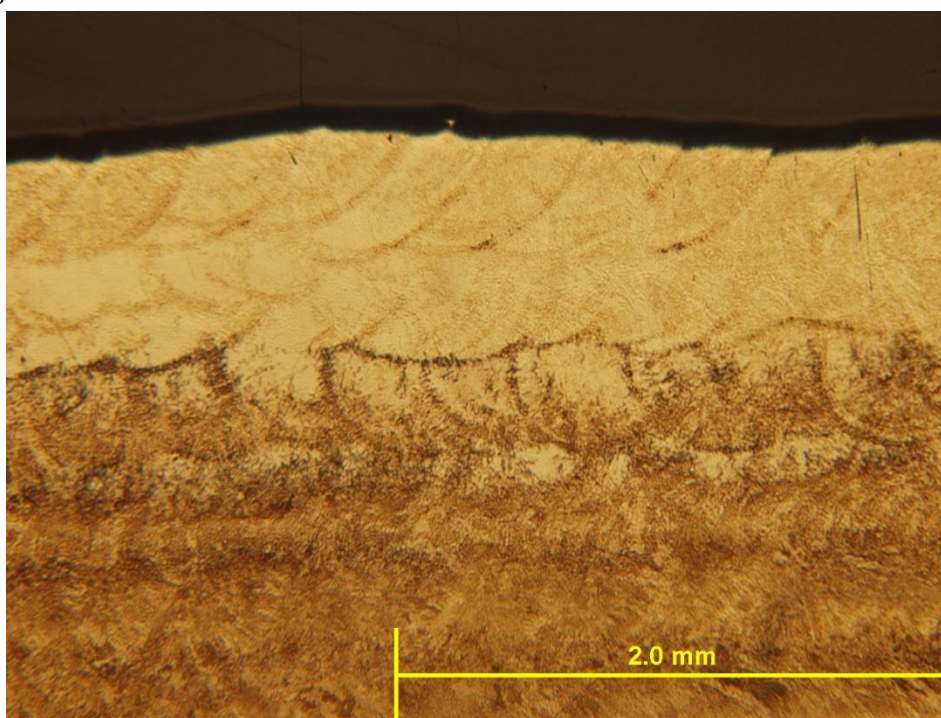
54. Ábra: Nagy méretű szemcsék a P-LD-7-H13-as mintadarabban (Kód: P-LD-7-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=60$ %)

A 54. Ábrával ellentétben kisméretű szemcsék keletkezésére jó példa az 55. Ábra. Itt meg kell jegyezni, hogy a két példának felhozott mintadarab eltérő additív technológiai paraméterekkel került legyártásra különböző időpontokban. Csak az alkalmazott technológia volt közös a két próbatest esetében. Ezen példa is jól mutatja a technológiára jellemző inhomogén szemcseszerkezet, illetve, hogy a technológiai paraméterek és a mintadarabon belüli elhelyezkedés milyen fajsúlyos mértékben befolyásolják a kialakult szemcseszerkezetet.



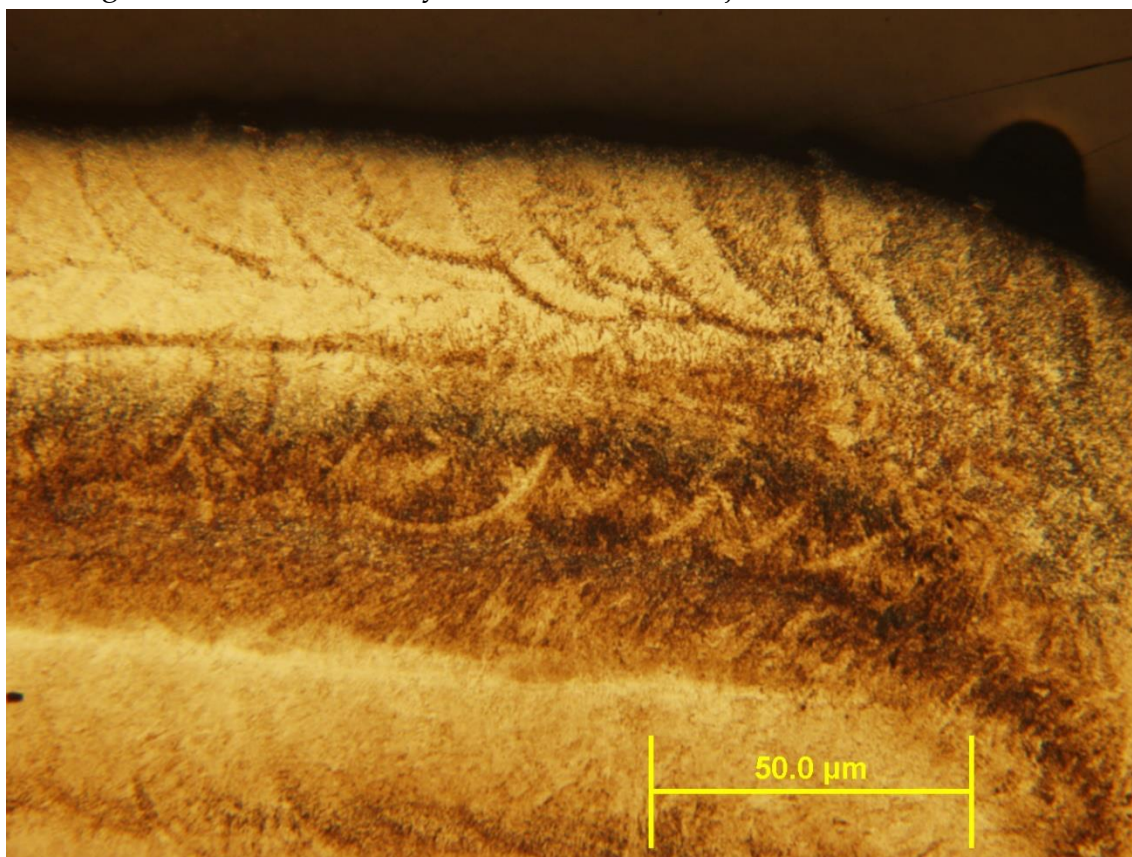
55. Ábra: Nagy méretű szemcsék a P-D-1-H13-as mintadarabban (Kód: P-LD--H13; Lézersugár teljesítmény $P=225\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=0,74\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=200\text{ μm}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)

A mikroszkopikus felvételeken minden esetben különböző arányokban, de elkülöníthető egy sötét és egy világosabb színű tartomány. Ez különösen az 56. Ábrán figyelhető meg.



56. Ábra: Szövetelemek elkülönülése a P-LD-6-H13-as mintadarab esetében (Lézersugár teljesítmény $P=292,5\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=0,74\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=200\text{ μm}$; Vonalköz $VK=1\text{ mm}$; Átfedés $OL=50\%$)

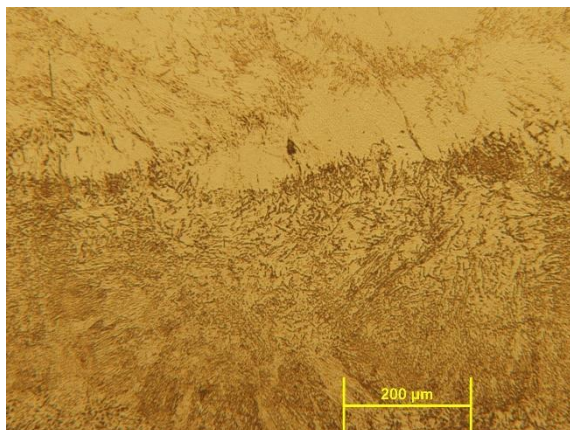
Az 56. Ábra, illetve kijelenthetem, hogy majdnem az össze ábra megfelel a 9. Ábrának, tehát a Mazumder és társai megállapításai [9] az általam legyártott mintadarabokra is igazak. Tehát a világos területen az ausztenit a domináns fázis, míg a sötét területen a martenzit. Ezen fázisok kialakulásának okát és a technológiai folyamat során fellépő sajátos ismétlődő hőkezelés hatását Mazumder és társai, illetve Bohlen és társai részletesen taglalták írásaikban, melyeket én a 2.3.11-es fejezetben már elemeztem.



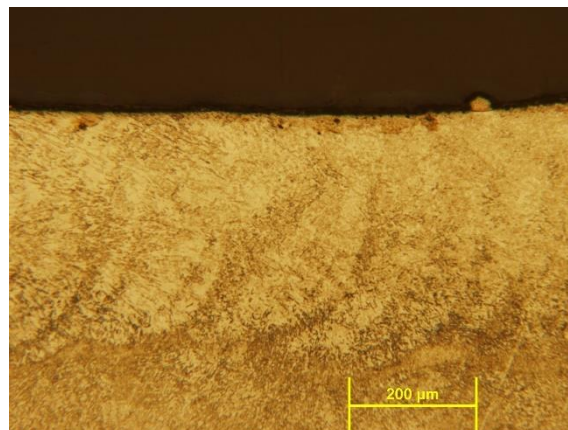
57. Ábra: Gyártási folyamat megszakításának eredménye a szövetszerkezeten. (Kód: P-LD-9-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405\text{ W}$; pásztázási sebesség $v=5\text{ mm/s}$; Lézersugár átmérő $d=0,74\text{ mm}$; Rétegvastagság $LH=200\text{ μm}$; Vonalköz $VK=0,74\text{ mm}$; Átfedés $OL=60\text{ \%}$)

A mintadarabok gyártását nyáron végzettem el, amikor is a hegesztő berendezés üzemtetési helyéül szolgáló csarnokban a hőmérséklet 24 °C - 25 °C körül mozgott. Ilyen magas hőmérséklet esetén a berendezés tápegysége túlmelegedett. Ezen okból kifolyólag a berendezés vezérlése, -amint a tápegység hőmérséklete túllépett egy értéket- leállította a gép működését. Ilyenkor nem tudtam mást tenni, mint megvárni (átlagosan 15-20 percet), míg a tápegység lehűl, majd folytatni a már megkezdett mintadarab gyártását. Ennek az eredménye látható az 57. Ábrán. Ugyanis a várakozás alatt a darabnak volt ideje leadni a hőjét, így az akkor még felső rétegekben ausztenit tudott képződni. Majd a megszakítás után felvitt alsóbb rétegek a szakirodalomnak [9,12] megfelelően ismét martenzitben gazdagokká váltak, míg a felsőbb rétegek ausztenitben gazdagok. Ezzel magyarázom az 57. Ábrán látható ismétlődő sötét-világos rétegeket.

Megfigyelhető, hogy bizonyos esetekben a felszínhez közeli, magasan, az időben utolsónak felvitt rétegben, az egyes megszilárdult ömledékek szélén jelennek meg a sötét foltok – lásd. 58. és 59. Ábra.

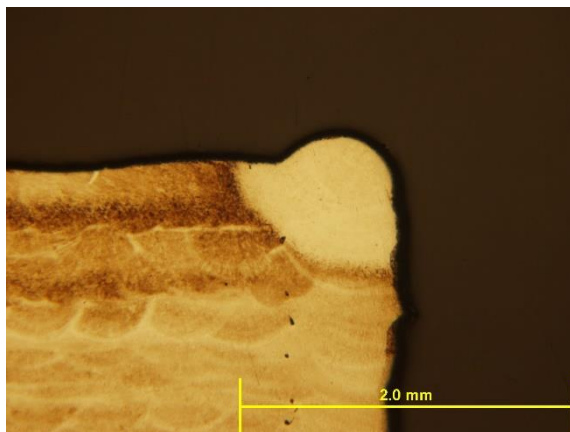


58. Ábra: Megszilárdult ömledékek határán jelentkező sötét színű kiválások (Kód: P-LD-6-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

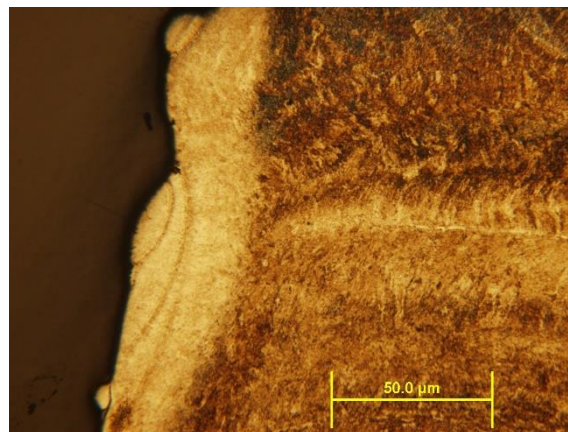


59. Ábra: Megszilárdult ömledékek határán jelentkező sötét színű kiválások (Kód: P-LD-2-H13; Lézersugár teljesítmény $P=337,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)

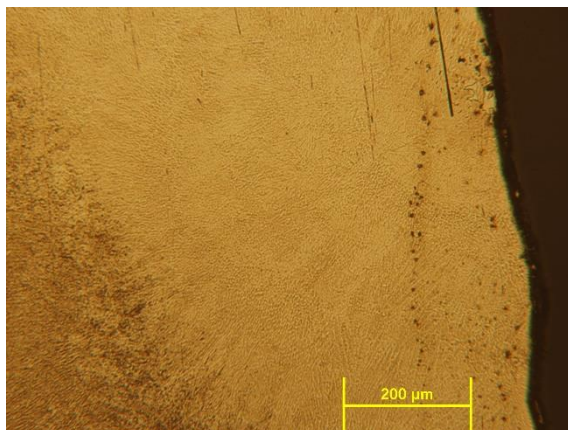
Továbbá még egy érdekes jelenség figyelhető meg: A mintadarabok sarkán vagy bizonyos esetekben majdnem az egész oldalán világos, markánsan elkülönülő zónák találhatók. Amit az alábbi Ábrák is mutatnak:



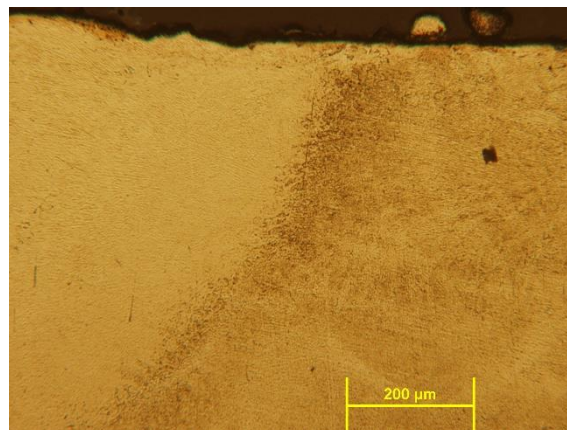
60. Ábra: A P-LD-1-H13-as mintadarab felső sarkában megfigyelhető világos terület (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)



61. Ábra: A P-LD-9-H13-as mintadarab oldalán megfigyelhető világos terület (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=60$ %)



62. Ábra: A P-LD-6-H13-as mintadarab oldalán megfigyelhető világos terület (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=50$ %)



63. Ábra: A P-D-5-H13-as mintadarab oldalán megfigyelhető világos terület (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=292,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=1,24$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μm; Vonalköz $VK=1$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

Ezekben az esetekben utoljára, mikor a majdnem kész mintadarab elkezdett hűlni, még a kontúr felhordásra került. Ilyenkor a hűlésnek induló alaptest még egy utolsó nagy hőbehatásnak volt kitéve, mely véleményem szerint lehetővé tette az ausztenit kialakulását a hő által befolyásolt területen, ezen terület szélén pedig martenzit tudott kiválni – lásd. 60. Ábra. A világos területek különböző alakját - 60. és 61. Ábra – pedig a kontúrnak beállított „offset” értékkel magyarázom. A megfelelő „offset” érték beállítása esetén a 60. Ábrán látható szövetszerkezetnek kell keletkeznie.

3.2. Forgácsolás esetén

3.2.1. KÍSÉRLETI TERV FORGÁCSOLÓ ERŐ MÉRÉSHEZ

A forgácsoló erők mérését egy váltólapkás, 16mm átmérőjű, $r=0,4$ mm -es éllekerekítésű MiSumi által gyártott egyélű szármarróval terveztem elvégezni. A szerszám adatlapját a 2. Mellékletben csatolom. 3 darab fogankénti előtolási értéket terveztem alkalmazni ezek rendre: 0,04 mm/ford; 0,08 mm/ford; 0,16 mm/ford. A forgácsolás során 3 db forgácsolási sebesség értéket terveztem alkalmazni. A gyártó által a lapkához ajánlott forgácsolási sebesség 170 m/perc, ha melegalakító (edzett) szerszámacél kerül megmunkálásra az adott lapkával. A lapka állagának megóvása érdekében ezt az értéket nem akartam túllépni, így a 170 m/perc-et elosztottam 3 felé, így a forgácsolási sebességek rendre a következők: 43 m/perc; 85 m/perc és 170 m/perc. Ezek alapján, hogy minden paraméter párt felhasználjak $3 \cdot 3 = 9$ darab mérésre lett volna szükségem, azonban a mérések során vizsgálni szerettem volna az egyen- és ellenirányú marás hatását is, ezért $2 \cdot 3 \cdot 3 = 18$ darab mérést kellett elvégeznem.

„A mintavételezési frekvencia az időegység alatt rögzített mérési adatok száma. A kiértékelés módja miatt (ld. 3.1 fejezetben: Normálás és transzformáció) minden szerszámfordulat során névlegesen ugyanannyi mérési pont rögzítendő állandó felbontással. Mivel forgómozgásról van szó, a felbontást a $\Delta\varphi$ szöginkremens határozza meg (azaz a szerszám minden egyes $\Delta\varphi$ szögelfordulását követően történik mintavételezés), ami legyen:”[17]

$$\Delta\varphi = 0,5^\circ$$

„Ezáltal a szükséges frekvencia:

$$f_m = \frac{n}{60} \cdot \frac{360^\circ}{\Delta\varphi} = \frac{n}{60} \cdot \frac{360^\circ}{0,5} = 12 \cdot n \quad (2)$$

Ahol:

- $f_m \left(\frac{1}{perc}\right)$: mintavételezési frekvencia
- $n \left(\frac{1}{perc}\right)$: fordulatszám

A forgácsolás során 40 darabra terveztem a mintavételezett fordulatok számát. A fogásmélységet $a_p=1,5$ mm -re terveztem, míg a fogás szélességet $a_e=5$ mm-re. Az additív technológiával előállított próbatestek ezért a következő méretekkel kellett, hogy rendelkezzenek: 11 mm szélesség, hogy a váll marása lehetséges legyen. A kísérlet terv szerint egy próbatesten egy előtolással 3 db forgácsolási sebességgel dolgoztam, ezért 3 darab fogás kellett vennem. A darab magasságára még ráhagyást kellett hagyni a síkolás céljából és ráhagytam még 2 mm-t, hogy el tudjam kerülni az alaplap esetleges nem kívánt megmunkálását. Így végül $3 \cdot 1,5mm + 2mm + 3,5mm = 10$ mm magas kellett, hogy legyenek a próbatestek. A próbatestek hosszát az alábbi képlettel határoztam meg:

$$L = f_z \cdot N + \Delta L + \frac{D}{2} \quad (1)$$

Ahol:

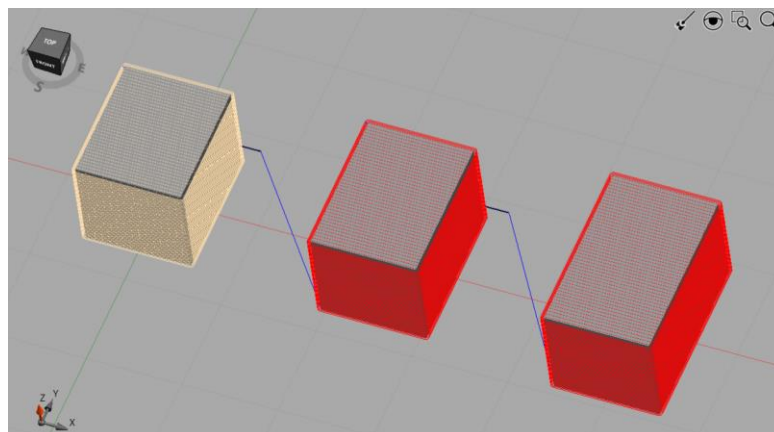
- $L(\text{mm})$ a próbatestek hossza
- $f_z(\text{mm/ford})$ a fogankénti előtolás
- $\Delta L=3(\text{mm})$: Rá- és lefutási ráhagyás. A forgácsolás során a mérést már a forgácsolás megkezdése után terveztem indítani és a mért adatokat a rendelkezésre álló programmal utólag kiértékelni. Ezért a rá- és lefutási ráhagyás értékét csökkenteni tudtam, ami az próbatestek additív gyártását tette költség- és időhatékonyabbá.
- $D(\text{mm})$ a megmunkáláshoz használt szerszám átmérője

Az így kapott eredményeket a sikeres additív gyártás érdekében egész milliméterre kerekítettem fel. Az additív technológiával legyártandó próbatestek méreteit az alábbi táblázat foglalja össze:

9. Táblázat: Próbatestek geometriai méretei az előtolás függvényében

Fogankénti előtolás (mm)	Próbatest hossza (mm)	Próbatest szélessége (mm)	Próbatest magassága (mm)
0,04	13	11	10
0,08	15	11	10
0,16	18	11	10

A mérés során a szerszámgép asztalára egy Kistler által gyártott 3-komponensű piezoelektromos erőmérő szenzor került felszerelésre, mellyel a forgácsoló erőt terveztem mérni.



Ábra 64: Próbatestek elrendezése a CAM programban

10. Táblázat: A mérések során használt technológiai paraméterek

Próbatest kódja	Fogankénti előtolás f_z (mm)	Forgácsoló sebesség v_c (m/min)	Főorsó fordulatszáma n (1/perc)	Mintavételezési frekvencia f_m (1/perc)
1/1	0,04	43	856	10270,7
1/2	0,04	85	1692	20302,5
1/3	0,04	170	3384	40605,1
2/1	0,08	43	856	10270,7
2/2	0,08	85	1692	20302,5
2/3	0,08	170	3384	40605,1
3/1	0,16	43	856	10270,7
3/2	0,16	85	1692	20302,5
3/3	0,16	170	3384	40605,1

3.2.2. ELŐKÉSZÜLÉS A MÉRÉSEKRE

Az első körös próbagyártások után megállapítottam, hogy a téglatestek három befoglaló mérete közül a névleges magasságot a legnehezebb elérni. Összességében megállapítottam, hogy az alkalmazott paraméter csoportok közül csak az utolsóval (lézersugár teljesítmény – két vonal közötti osztás nagysága) lehetett az előírt magasságot elérni. Ezen paraméterekből kiindulva módosítottam a paramétereken. Kísérleti jelleggel növeltem a lézersugár teljesítményét, ahol szükségesnek éreztem. Az új paramétereket 11. Táblázat tartalmazza. Meglepődve kellett tapasztalnom, hogy ugyan abból az anyagból, ugyan azon a berendezésen, ugyan arra az alaplagra végzett gyártás esetén a magasságban lényeges, 1 mm-es csökkenés lépett fel. Ez jól látható a 35. Ábrán, ahol a felső sorban lévő darabok készültek a „finomított” paraméterekkel. Ekkor már a H13-as fém por mennyiség is lecsökkent, és a rendelkezésemre álló idő is kevés volt, ezért kiválasztottam egy olyan paraméter csoportot, amivel a korábban stabilan az előírt magasság fölé sikerül gyártani és ezen paraméter csoportnál a lézersugár teljesítményét 10 %-al megnőveltem és ezzel a paraméter csomaggal kezdtem a forgácsolási kísérlet tervnek megfelelő első próba test legyártását.

11. Táblázat: Forgácsolhatósági vizsgálatokhoz gyártott próbatestek additív technológiai paraméterei

Teljesítmény $P(\%)$	Teljesítmény $P(W)$	Sebesség $v(mm/s)$	Spot Size (mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Overlap (%)	Hatch distance (mm ⁹)
80%	360	5	0,74	200	0,74	50%	0,37

Ezt a jelenséget én a berendezés nem megfelelő üzemi körülményeivel magyarázom. A csarnokban, ahol a berendezést üzemelteti a Csepeli Szerszámgépgyártó Kft., nem tartható fenn állandó hőmérséklet, légnyomás, páratartalom. A berendezéssel való

munkám során 2021. február-márciusában például 10-15 °C körüli volt a hőmérséklet, míg nyáron, július-augusztusban 25 °C vagy afölötti. A berendezés tápegysége ilyen környezeti hőmérsékletnél és beállított technológiai paramétereknél túlmelegedett és a vezérlés automatikusan leállította a gépet. A munka folytatásához általában 15 percet kellett várnom, hogy a berendezés tápegysége elfogadható szintre hűljön vissza. Ily módon a gyártás folytonossága megszakadt.

A forgácsolhatósági vizsgálatokhoz szükséges próbatestek gyártását a 11. Táblázatban található paraméterek felhasználásával készítettem el. Elsőként egy 13 mm×11 mm×10 mm-es méretű téglatest gyártása volt a cél. Az eredmény az alábbi képen látható:



65. Ábra: Elsőként legyártott forgácsoló erők mérésére szánt próbatétel.

A 65. Ábrán jól látható, hogy a gyártás folyamata a réteg lefektetése közben összeomlott és a darab teteje nem érte el a szükséges síklapúságot. Ebben az esetben nem tudtam mást tenni, mint a lézersugár teljesítményét tovább növelni és megváltoztatni a próbatestek méretét. Az új additív gyártástechnológiai paramétereket a 12. Táblázat tartalmazza.

12. Táblázat: A gyakorlati tapasztalatok alapján módosított additív technológiai paraméterek

Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Spot Size (mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Overlap (%)	Hatch distance (mm)
85%	382,5	5	0,74	200	0,74	60%	0,444

A próbatestek magasságát 5 mm-re csökkentettem. Hogy a szükséges számú próbaforgácsolás elvégezhető legyen, egy adott méretű próbatételből 3 db került legyártásra. Ezek alakja és méretei már rendre kielégítőek voltak. Ezek a próbatestek láthatóak az alábbi ábrákon.



66. Ábra: Balról jobbra rendre az "1/1"-es; "1/2"-es és "1/3"-as jelű próbatestek



67. Ábra: Balról jobbra rendre az "1/1"-es; "1/2"-es és "1/3"-as jelű próbatestek



68. Ábra: Balról jobbra rendre az "3/1"-es; "3/2"-es és "3/3"-as jelű próbatestek

A 66.-68. Ábrákon látható próbatestek méreteit egy Mitutoyo Tolómérővel ellenőriztem, a mérések eredményeit a 8. sz. Mellékletben csatolom. Ezen eredmények egyértelműen mutatják az adott technológiával elérhető ismétlési pontosságot. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy minden additívan gyártott próbatest ugyan azzal az additív technológiai -12. Táblázatban található- paraméterek felhasználásával került legyártásra, csupán az általam nem befolyásolható környezeti paraméterekben (hőmérséklet, páratartalom) volt jelentős eltérés. Jól látható, hogy volt olyan eset, amikor a névleges magasságot a legyártott próbatest magassága, még a lekisebb mért magasság esetében is több milliméterrel meghaladta. Erre jó példa a „1/2”-es kódú próbatest, ahol a legkisebb mért magasság is 6,55 mm volt. Azonban ennek az ellenkezője is igaz volt több próba test esetén: a „2”-es jelű alaplapon található próbatestek legkisebb mért magassága például sehol sem haladta meg az előírt 5 mm, két olyan próbatest is volt ahol a legnagyobb mért magasság sem érte el az előírt 5 mm-t. Ez szerencsére nem jelentett problémát, ugyanis a próbatest rendelkezett megfelelő mennyiségű technológiai ráhagyással, hogy a forgácsolhatósági vizsgálatokat el lehessen rajta végezni.

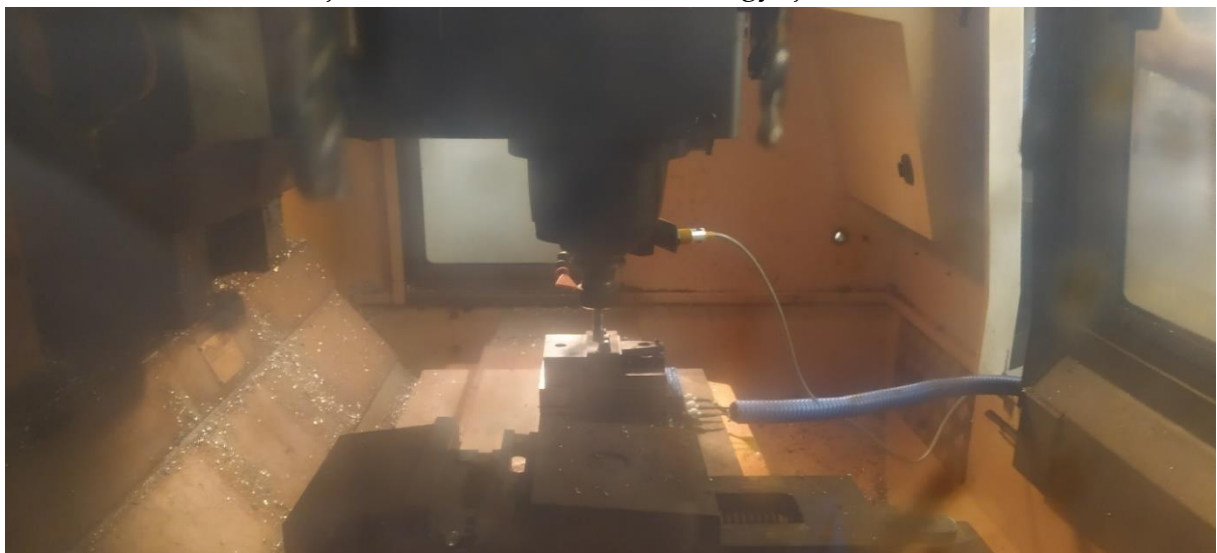
Az eredményekből az is megfigyelhető, hogy egy adott próbatest magasságában jelentős különbségek voltak. Az „1” -es jelű alaplapra nyomtatott próbatestek esetén az átlagos eltérés a legkisebb és legnagyobb magasság közt 1,48mm volt (Itt meg kell jegyezni, hogy az első, rossz minőségű próbatest a magasságetlértékek átlagát jelentősen növelte.); a „2”-es jelű alaplap esetében 0,93 mm; míg a „3”-as jelű alaplapra gyártott próbatestek esetében 1,15 mm volt.

Ezen próbatesteket az egymástól való megkülönböztetés céljából egyedi azonosító kóddal láttam el: „Próbatest alaplapjának sorszáma / Additívan gyártott próbatest sorszáma az adott lapon”

3.2.3. FORGÁCSOLÁSI ERŐK MÉRÉSE

A forgácsolási erők mérését a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és Technológia Tanszék Kondia 640B CNC megmunkáló központján végeztem el egy Kistler 9281B típusú erőmérő szenzor segítségével. A mérés lánc tagja volt egy Kistler 9863A típusú töltéserősítő, egy Omron E3F-DS10B4 jelenlétérzékelő, egy National Instrument által gyártott USB-4431 adatgyűjtő, végül pedig egy LabView programmal ellátott laptop. A mérések a fellépő X-, Y- és Z-irányú erő komponensek voltak mérve, illetve egy jelenlét szenzor segítségével négyszög jel lett generálva, melyből kiindulva a periódus idő határozható meg.

A darabok megfelelő előkészítése és síkmarása után a mérés első lépéseként egy kalibrációs marást hajtottunk végre, melynek jelentősége a mérés kiértékelése során volt. Az adatok gyűjtésére a Forgácsolási folyamatok c. tantárgy GY1-es gyakorlatán használt, Dr. Biró István adjunktus úr által készített adatgyűjtő szoftvert használtam.



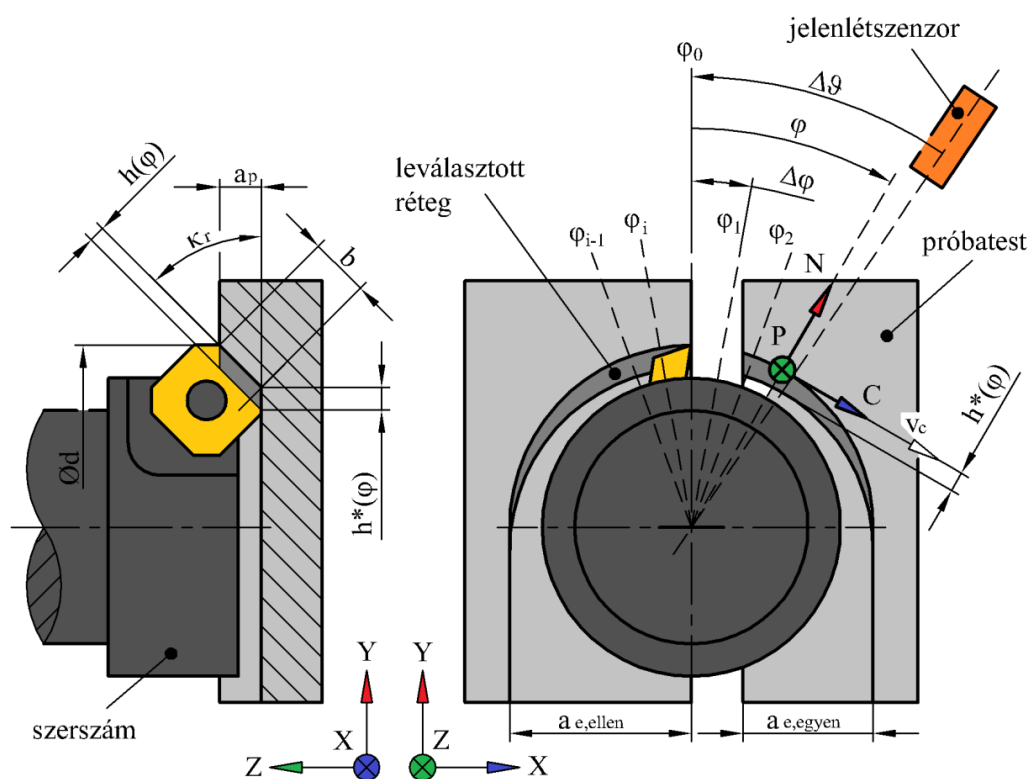
69. Ábra: Balról jobbra rendre az „3/1”-es; „3/2”-es és „3/3”-as jelű próbatestek

3.2.4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

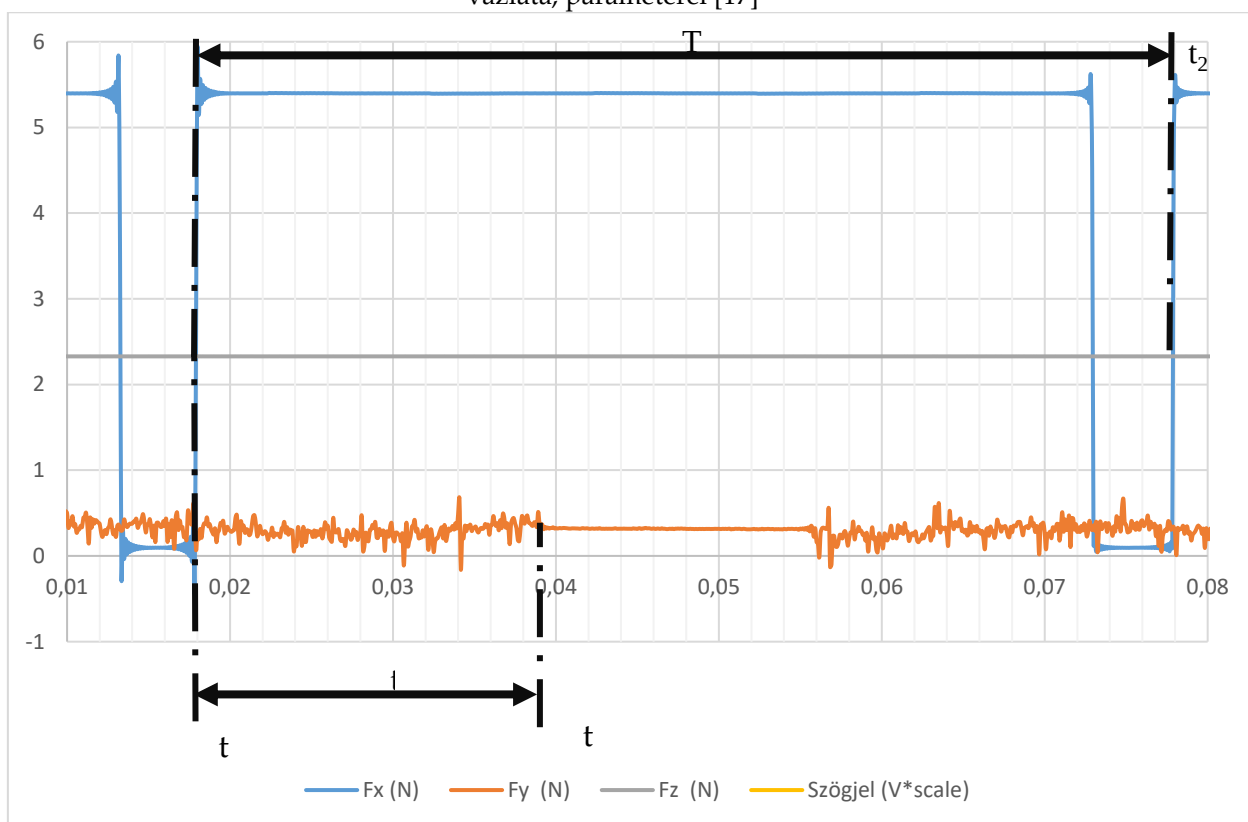
3.2.4.1. Erőmérés során meghatározott adatok kiértékelése

A mért adatok kiértékelését a „mg01-GY1_Maras-kiertekeles_program.exe” kiértékelő programmal végeztem el, mely programot dr. Biró István egyetemi adjunktus úr készített a Forgácsolási folyamatok című tantárgy GY1 laborgyakorlatára. A laborgyakorlat sillabuszát az 7.17. Mellékletben csatolom. [17] A mért adatok kiértékelését ezen dokumentum lépései szerint a „mg01-GY1_Maras-kiertekeles_program.exe” programmal és saját készítésű excel táblával készítettem el, melyet a variancia vizsgálat - ANOVA: Analysis of Variance - során használtam. Elsőként az egyszerűsített Kienzle-Victor modellt alkalmaztam minden mérésre, mérésenként külön-külön. Majd a bővített Kienzle-Victor modellt alkalmaztam a korábban említett laborsillabusz [17] gondolatmenetének megfelelően. Az említett dokumentum részletesen bemutatja a „mg01-GY1_Maras-kiertekeles_program.exe” program használatát is. A kiértékelő programmal legenerált erőkomponenseket (forgácsolóerő, passzíverő és normálerő) az idő függvényében mérésenként ábrázoló grafikonokat a 7.13. Mellékletben csatolom. Bizonyos méréseket megismételtem, hogy a mérés ismételhetőségi pontosságáról felvilágosítást kapja. Ezek az ismételt mérések rendre a következők voltak: 1.; 2.; 9.; 10.; 17. és 18. Mérés. Ezen mérési adatokból a „mg01-GY1_Maras-kiertekeles_program.exe” programmal meghatározott erőket – forgácsolóerő, passzíverő és normálerő – az idő függvényében grafikonon ábrázoltam és az így kapott grafikonokat a 7.14.sz. Mellékletben csatoltam.

A kompenzációs szög $\Delta\vartheta$ a $\varphi_0 = 0$ referencia hely meghatározásának érdekében van szükség. A kompenzációs szöget a kalibrációs mérés során kapott adatokból határoztam meg.



Ábra 70: A Forgácsolási folyamatok Gy1-es laborgyakorlatán alkalmazott mérés mérési összeállítás vázlata, paraméterei [17]



71. Ábra: Kalibrációs mérés során gyűjtött adatokból kiemelt egy periódus értelmezése

A négyszög jel felfutó ágának közéértékének az időpillanata legyen t_0 . A periódus idő a négyszög jel két felfutó ága közötti idő. Az 1. Grafikonon jól látható az az idő pillant - t_1 -, amikor F_y erő komponens jele kiegyenesedik, ettől az időpillanattól kezdve történik a forgácsolás. Tehát ez az idő intervallum felelne meg annak az időszávnak – 14. ábra szerint - amíg a szerszám áthalad a kompenzációs szögön.

Azonban én a forgácsolási vizsgálatot a 14. ábrával ellentétes forgácsolási irányban hajtottam végre. (A 14. ábra értelmezése alapján negatív „Y” irányba) Ezért a kompenzációs szög az alábbi képlettel határozható meg:

$$\Delta\vartheta = \pi - \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t_1 - t_0) \right) \quad (3.2.4.1.1.)$$

Ahol:

- $\Delta\vartheta$ (rad): Kompenzációs szög
- T (s): periódus idő
- t_0 (s): A négyszög jel felfutó ágának idő pillanta
- t_1 (s): F_x erő komponens jelének „kiegyenesedésének” időpillanata

A kalibrációs mérés eredményeiből öt darab periódust emeltem ki és ábrázoltam excel program segítségével. Az ábrázolt grafikonokról leolvastam a szükséges idő pillanatokat, melyekből meghatároztam öt darab kompenzációs szöget. Ezen szögeknek vettem az átlagát és a szórását.

13. Táblázat: Kalibrációs mérési adatokból meghatározott időpillanatok és kompenzációs szögek

Sorszám	t_0 (s)	t_1 (s)	t_2 (s)	T [s]	Kompenzációs szög	
					[rad]	[°]
1.	0,018	0,039	0,078	0,060	0,925	52,998
2.	0,376	0,398	0,436	0,060	0,838	48,000
3.	0,197	0,218	0,257	0,061	0,909	52,066
4.	0,496	0,517	0,555	0,059	0,905	51,864
5.	0,615	0,636	0,675	0,060	0,942	54,000

A 13. Táblázat adatai alapján a Kompenzációs szög átlaga 52° . A későbbiekben a „mg01-GY1_Maras-kierkeles_program.exe” programban ezt az értéket használtam.

Az egyszerűsített Kienzle-Victor modellt a következő képlet írja le:

$$F_{c,a} = k_{c1} \cdot h^{x_{F,a}} \cdot b^{y_{F,b}} \quad (3.2.4.1.2.)$$

Ahol:

- $F_{c,a}$ (N): Forgácsoló erő
- k_{c1} $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$: Fajlagos forgácsoló erő
- h (mm): forgácsvastagság
- b (mm): forgácsszélesség
- $x_{F,a}$; $y_{F,b}$ (-): anyagparaméterek

A „mg01-GY1_Maras-kierkeles_program.exe” programmal generált adatok alapján elsőként mérésenként az egyszerűsített Kienzle-Victor modellt alkalmaztam, mely

a forgácsolási sebesség hatását nem veszi figyelembe. A mért adatok grafikonon történő ábrázolása alapján csak a stabil forgácsolás tartományában végeztem el a számításaimat. Például az 1. Mérés esetén a marás befejezésekor, - amikor a szerszám kilép az anyagból-, az erő értékekben nagymértékű ugrás figyelhető meg. (Lásd. 7.13. sz. Melléklet - 1. Mérés). A mért adatok értelmezhetőségének és más adatokkal való összehasonlításának az érdekében ezt az „ugrás” tartományt nem vettem figyelembe. Ezen megfontolás szerint jártam el a többi mérési adatsor kiértékelése esetében is. Illetve a bővített Kienzle-Victor modell alkalmazása esetén is csak ezen tartományokat vettem figyelembe.

A regresszió számítást ebben az esetben is a Forgácsolási folyamatok című tantárgy GY1-es laborsillabuszának [17] megfelelően végeztem el. A sillabusz anyagának megfelelően feltételeztem, hogy : $y_{F,b} = 1$. Mivel az egyszerűsített Kienzle-Victor modell nem veszi figyelembe a sebesség hatását ezért a GY1 laborgyakorlat sillabuszában található „(20)”-as kifejezés az alábbi alakban jelenik meg:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{a} = \underline{a} \quad (3.2.4.1.3.)$$

Ahol:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N H_i \\ \sum_{i=1}^N H_i & \sum_{i=1}^N H_i^2 \end{bmatrix} \quad \underline{a} = \begin{bmatrix} K \\ x_{F,a} \end{bmatrix} \quad \underline{a} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N E_i \\ \sum_{i=1}^N E_i H_i \end{bmatrix}$$

Ahol:

- $N (-)$: a stabil forgácsolás tartományába eső mérési pontok száma
- $H_i = lgh_i$; ahol $h_i (mm)$ az i . mérési pont forgácsvastagsága
- $E_i = lg\left(\frac{F_{c,mért,i}}{b}\right)$; ahol $F_{c,mért,i} (N)$ az i . mérés pontban mért forgácsoló erő és $b [mm]$: forgácsszélesség
- $K = lgk_{c1}$; ahol $k_{c1} \left(\frac{N}{mm^2}\right)$: Fajlagos forgácsoló erő
- $x_{F,a}$: anyagparaméterek

A „(4)”-es képletből már meg lehet határozni az általam keresett paramétereket.

$$\underline{\underline{A}}^{-1} \cdot \underline{a} = \underline{a} \quad (3.2.4.1.4.)$$

Ezen számításokat mindegyik mérés esetében elvégeztem. A kapott k_{c1} értékeket az alábbi táblázatokban mutatom be:

14. Táblázat: Egyenirányú marások során meghatározott fajlagos forgácsolóerő és forgácsvastagság hatványkitevő értékek

Mérés sorszáma	2.	4.	6.	8.	10.	12.	14.	16.	18.
Fajlagos forgácsolóerő (N/mm^2)	783,7	439,5	483,6	636,7	553,6	696,9	573,1	553,3	736,5
Forgácsvastagság hatványkitevője (-)	0,79	0,89	0,89	0,84	0,89	0,90	0,77	0,83	0,86

15. Táblázat: Ellenirányú marások esetében meghatározott fajlagos forgácsoló erő és forgácsvastagság hatványkitevő értékek

Mérés sorszáma	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.	17.
Fajlagos forgácsoló erő (N/mm ²)	9214,6	2591,0	2854,0	2897,1	1986,1	1511,5	1507,1	1663,4	3097,5
Forgácsvastagság hatványkitevője (-)	0,03	0,42	0,39	0,31	0,45	0,59	0,33	0,36	0,14

Ellenirányú marás esetében a fajlagos forgácsoló erő átlaga 3035 N/mm² volt 2400-as szórással. Ezt nagymértékű szórás melyet, a 10. Táblázatban található értékeket megfigyelve megállapítható, hogy az első mérési adatokból számolt fajlagos forgácsoló erő adja. Ezen mérés adataiból meghatározott fajlagos forgácsoló erő nélkül az átlag 2263 N/mm² 668-as szórással. Az 1. és 2. Mérést az „1/1’-es próbatesteken végeztem el. Ez a próbatest volt az első legyártott próbatest, melyet a forgácsoló erők mérésére szántam. Ezen próbatest gyártási tapasztalatai alapján kénytelen voltam csökkenteni a próbatestek magasságát és az additív technológiai paramétereken kismértékben változtatni. Ezért hagytam el az átlagszámításnál az első, majd az egyenirányú marás számítása esetében a második mérés során kapott fajlagos forgácsoló erő értéket.

A 10. és 11. táblázatból jól látható, hogy az egyenirányú marás esetében a kapott fajlagos forgácsoló erő értékek nagyságrenddel kisebbek. Átlaguk 606 N/mm² 115-ös szórással. A 2. mérés során kapott értéket elhagyva az átlag 584 N/mm² volt 101,2 N/mm² szórás mellett.

Az általam meghatározott $x_{F,a}$ anyagparaméterből mérésenként meghatároztam az m_c forgácsvastagság hatványkitevőjét az alábbi képlettel:

$$m_{c,i} = 1 - x_{F,a,i} \quad (3.2.4.1.5.)$$

Ahol:

- $m_{c,i}$ (-): az i. mérés során meghatározott forgácsvastagság hatványkitevője
- $x_{F,a,i}$ (-): az i. mérés során számolt anyagparaméter

Az így kapott értékeknek kiszámoltam (excel tábla segítségével) az átlagát és szórását, megkülönböztetve ellen és egyenirányú marást – lásd. 10. és 11. Táblázat. Egyenirányú marás esetében ez az átlag 0,86 volt, 0,04-as szórással, míg ellenirányú marás esetében 0,37 a hozzá tartozó 0,13-as szórással.

A kapott eredményeket grafikus ábrázolással ellenőriztem. Elsőként a mérési adatok kiértékelése során kapott k_{c1} és $x_{F,a}$ visszahelyettesítésével az egyszerűsített Ki-enzle-Victor modellben meghatároztam a forgácsoló erőt.

$$F_{c,számolt,i} = k_{c1} \cdot h_i^{x_{F,a}} \cdot b^{y_{F,b}} \quad (3.2.4.1.6.)$$

Ahol:

- $F_{c,számolt,i}$ (N): Forgácsoló erő
- k_{c1} ($\frac{N}{mm^2}$): Adott mérés kiértékelése során meghatározott fajlagos forgácsoló erő
- h_i (mm): i. mérési pont forgácsvastagsága
- b (mm): forgácsszélesség; jelen mérési sorozatnál $b = 1,5 \text{ mm}$

- $x_{F,a}$; $y_{F,b}(-)$: anyagparaméterek

Az ilyen módon „visszaszámolt” forgácsoló erőket adott mérés során mért és figyelembe vett forgácsoló erőkkel együtt az idő függvényében ábrázoltam. Az így kapott grafikonokat a 15. sz. Mellékletben csatolom. Általánosságban megállapítható, hogy a grafikonon a mért és számolt forgácsoló erők görbéi kielégítő mértékben illeszkednek egymásra. Kijelenthető, hogy az egyszerű Kienzle-Victor modell alkalmazásával mért adatokat megfelelő mértékben sikerült megközelíteni és a számítások során kapott paraméterek (k_{c1} és x_{Fa}) valóságosnak tekinthetők.

„A normálerő és passzív erő alakulását a forgácsolóerőhöz viszonyítva értékeljük.” (17) Éppen ezért meghatároztam mérésenként az arányszámokat a GY1 laborgyakorlat sillabuszának megfelelően, majd ábrázoltam őket az idő függvényében. Az így eredményül kapott grafikonokat a 7.16. sz. Mellékletben csatoltam.

A bővített Kienzle-Victor modellt a GY1 laborgyakorlat segédlete [17] szerint alkalmaztam lépésről lépésre. A számítások menete, az egyes kifejezések közti összefüggések a korábban említett dokumentumban megtalálhatók. Ezt a dokumentumot csatoltam az 17. sz. Mellékletben.

„A modell illeszkedési „jóságának” értékelése történhet szemrevételezéssel (pl. diagramon való ábrázolással), továbbá az ANOVA standardizált mérőszámai segítségével. Utóbbiak jellegzetes képviselője a determinációs együttható (R^2). A R^2 determinációs együttható megmutatja, hogy a mért adatok varianciájának hány százalékát magyarázza meg a modell varianciája. ... $R^2 = 1$ esetén a regressziós modell tökéletesen leírja a mérésből származó pontok átlagos viselkedését, $R^2 = 0$ esetén pedig egyáltalán nem.” [17] Jelen mérés során az R^2 ellen irányú marás esetében $R^2=0,998970925$; míg egyen irányú marás esetében $R^2=0,999968002$ volt. Ezen számok alapján kijelenthetem, hogy a regressziós modell kielégítő mértékben írja le a mérésből származó pontok átlagos viselkedését.

A Csepeli Szerszámgépgyár Kft. által legnagyobb mértékben megmunkált anyag az S235JR és C45-C45E. Ezért a kapott fajlagos forgácsoló erőket és forgács vastagság hatványkitevőket az ezekre az anyagokra jellemző értékekkel hasonlítottam össze. A számított fajlagos forgácsoló erők alapján megállapítható, hogy egyenirányú marás esetében a kapott értékek kisebbek mind az S235JR $k_{c1.1} = 1610 \frac{N}{mm^2}$ -es [18] értékénél, mind a C45 $k_{c1.1} = 1680 \frac{N}{mm^2}$ -as [19] értékénél. Ellenirányú marás esetében a legtöbb esetben a kapott fajlagos forgácsoló erők meghaladják a C45 és az S235JR fajlagosforgácsoló erejének értékét. Azonban a 11. és 13. mérések során meghatározott értékek még az S235JR fajlagos forgácsoló erejét sem haladják meg. A 15. Mérés esetében a kapott „ k_c ” nagyobb mint a C45 és S235JR fajlagos forgácsoló ereje azonban kisebb, mint a C45E $k_{c1.1} = 1765 \frac{N}{mm^2}$ -as [19] értéke. A szakirodalom alapján ez eddig összehasonlításhoz használt anyagokra jellemző forgácsvastagság hatványkitevők rendre a következők: S235JR $m_c = 0,34$ [18]; C45 $m_c = 0,26$ [19] és C45E $m_c = 0,25$ [18]. Megállapítható, hogy az egyenirányú marások méréseiből meghatározott értékek átlaga

nagyságrendekkel meghaladta a korábban felsorolt értékeket. Ellenirányú marás esetében a méretdatokból meghatározott forgácsvastagság hatványkitevők átlaga az S235JR értékéhez áll a legközelebb (egy kicsi meghaladva azt), míg a C45 és C45E-t túllépi.

A fémpor gyártójának állítása szerint az általa forgalmazott AISI H13-as fémporból additív úton gyártott, majd hőkezelt darabok szakító szilárdsága $R_m = 1890 \text{ MPa}$ körül mozog. A szakirodalom [19] ezen szakítószilárdság érték alapján ($R_m > 1200 \text{ MPa}$) a nehezen forgácsolható szerszámacélok közé sorolja, melyekre jellemző átlagos fajlagos forgácsoló erő $k_{c1.1} = 2500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ és jellemző $m_c = 0,27$ forgácsvastagság hatványkitevő. Az egyenirányú marások adataiból meghatározott „kc” érték nagyságrendekkel kisebb, mint a szakirodalomban szereplő fajlagos forgácsoló erő érték. Ellenirányú marás esetében a kapott „kc” értékek átlaga egy nagyságrendbe esik a szakirodalomban szereplő értékkel, azonban a mért adatokból meghatározott „kc” értéke nagy szórással rendelkeznek. A forgácsvastagság hatványkitevőjét tekintve egyenirányú marás esetében a mérésekből számolt átlagos érték nagyságrendekkel meghaladja a szakirodalomban szereplő értéket. Ellenirányú marás esetében nagyobb az átlalam számolt átlagos érték, azonban csak egy nagyságrenddel.

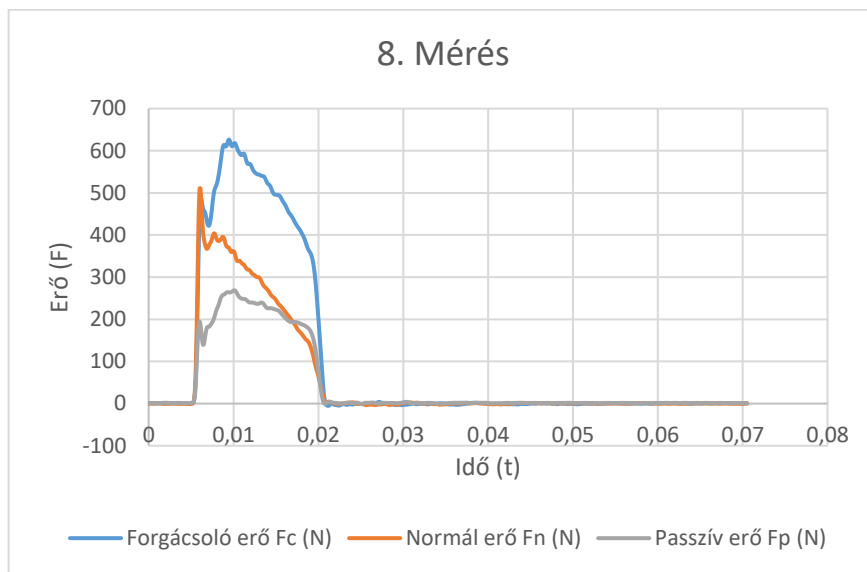
A 16. sz. Mellékletben csatolt erőarányokat szemre vételezve megállapítható, hogy a normál és forgácsolóerő aránya 0,1-1 közötti tartományon mozgott. A passzív és forgácsolóerő aránya 0,2-0,6 közötti tartományban mozgott a különböző mérések során. Ha csak az erő arányokat vesszük figyelembe, akkor a 13. és 14. Mérés során vasalás lépett fel, mert ebben az esetben a szerszám és az anyag a forgácsoló erőt megközelítő nagyságú erővel hatottak egymásra.

A mérés adatok kiértékelése alapján megállapítható, hogy ellenirányú marás esetében, - miután a forgácsolás folyamata stabilizálódott-, a főforgácsoló erő mértéke mindig meghaladta a normál erő mértékét.

A 10. és 18. mérésnél rezgés lépett fel, ez jól megfigyelhető a 7.13. sz. Mellékletben csatolt grafikonokon.

Az ismételt mérésekből generált forgácsoló erők grafikonjait összevetve – lásd. 7.14. sz. Melléklet – általános következtetést nem tudtam leszűrni. A legtöbb esetben az ismétlődő mérések során nagyobb forgácsoló erőkre volt szükség. Azonban a 9. és a 10. Mérés ismétlése során meghatározott forgácsoló erők egy nagyságrendbe estek az eredeti mérés során meghatározott erőkkel.

Az erőmérések során kapott grafikonokon bizonyos esetekben észre vehető egy lépcső/ugrás a forgácsoló erő értékében a forgácsolás megkezdésekor. Erre jó példa a 8. mérés, mely során mért erők az idő függvényében a 38. Ábrán láthatók.

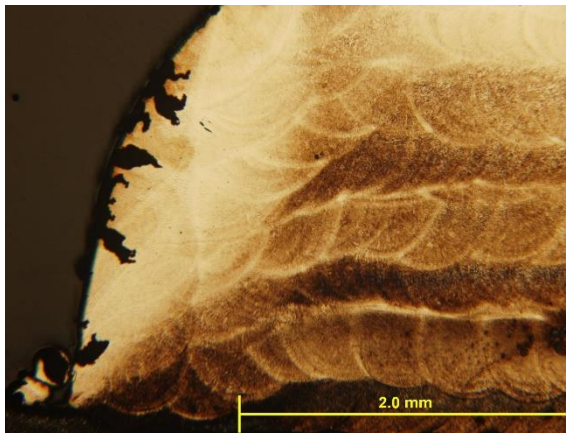


72. Ábra: 8. mérés (technológiai adatok: fogankénti előtolás $f_z=0,08\text{mm/ford}$; forgácsolási sebesség $v_c=43\text{ mm/min}$)

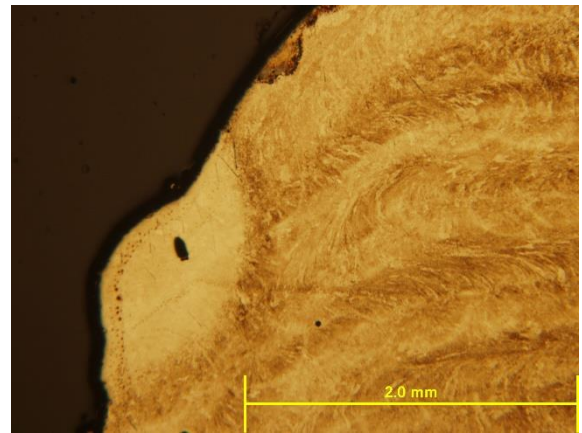
Véleményem szerint erre több magyarázat is lehet. Elsőként az additív gyártás során jelentős fröcskölődés lépett fel, ahogy az a 84. és 85. ábrákon is látható. Ebben az esetben a marónak elsőként az alaptest anyagszerkezetétől eltérő fröcskölődést kellett eltávolítania a marás megkezdésekor. Úgy gondolom, hogy ez eredményezheti az ugrást a forgácsoló erő értékében.

További magyarázataimat erre a jelenségre a készült mikroszkópikus felvételek alapján teszem. Mivel a csiszolatok esetében eltérő additív technológiai paramétereket használtam, mint a későbbi forgácsolhatósági vizsgálatra szánt próbatestek esetében, ezért a soron következő magyarázatok csak feltételezések részemről. Ezen feltételezések igazolásához vagy éppen cáfolatához további vizsgálatokra van szükség.

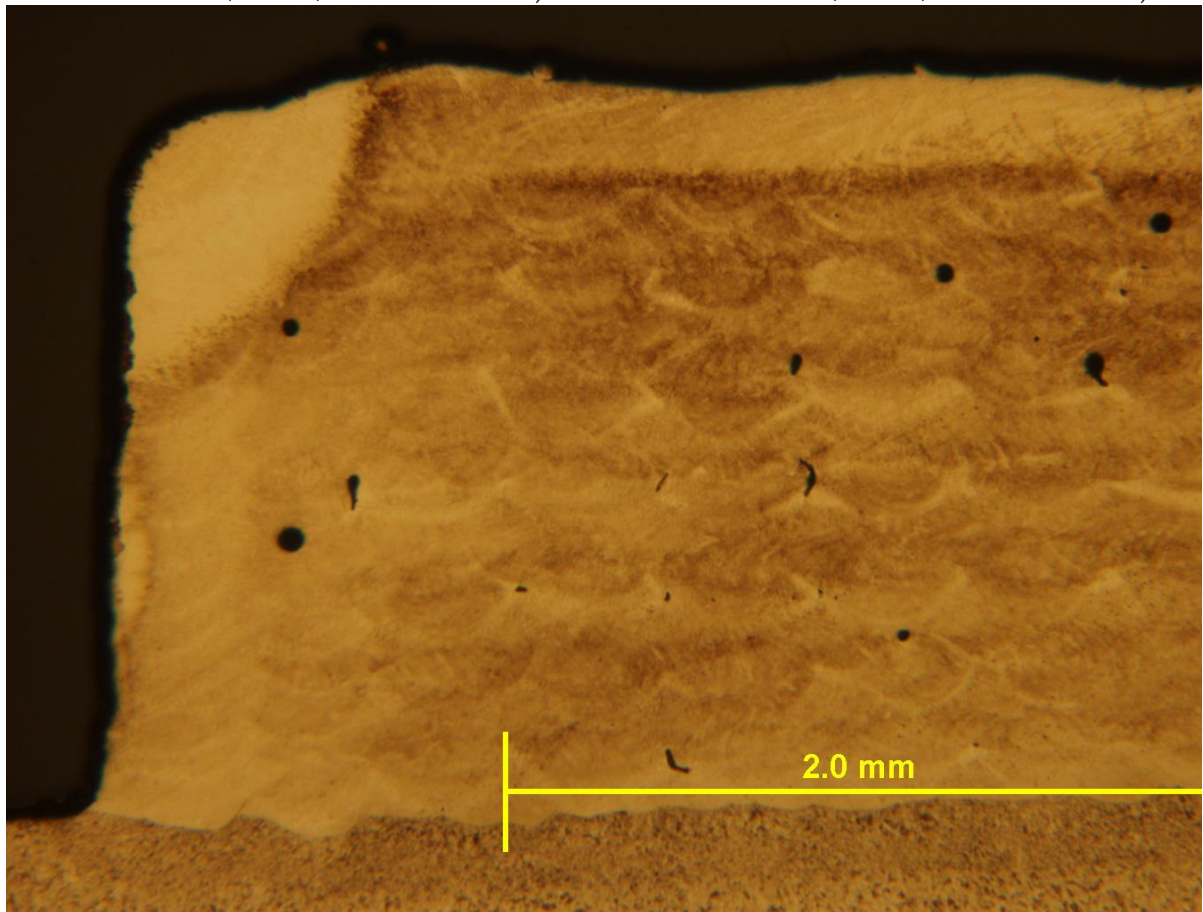
A nem megfelelő kontúr „offset” érték esetén a gyártott téglatest alakú próbatest lényegében gúla lesz. Az így legyártott próbatest szélén az egyes rétegek az alaplap síkjával nem párhuzamosak lesznek, hanem szöget fognak bezárni. Ez a jelenség látható a 73. és 74. Ábrán. Ezzel szemben a megfelelő rétegeképződésre jó példa a 75. Ábra, ahol az egyes felvitt rétegek jó közelítéssel végig párhuzamosak az alaplap síkjával, és a kontúr és az alaptest között jelentős porozitás sem képződött.



73. Ábra: Nem megfelelő réteg képződés (Kód: P-LD-3-H13; Lézersugár teljesítmény $P=405$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=40$ %)



74. Ábra: Nem megfelelő réteg képződés (Kód: P-LD-5-H13; Lézersugár teljesítmény $P=337,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

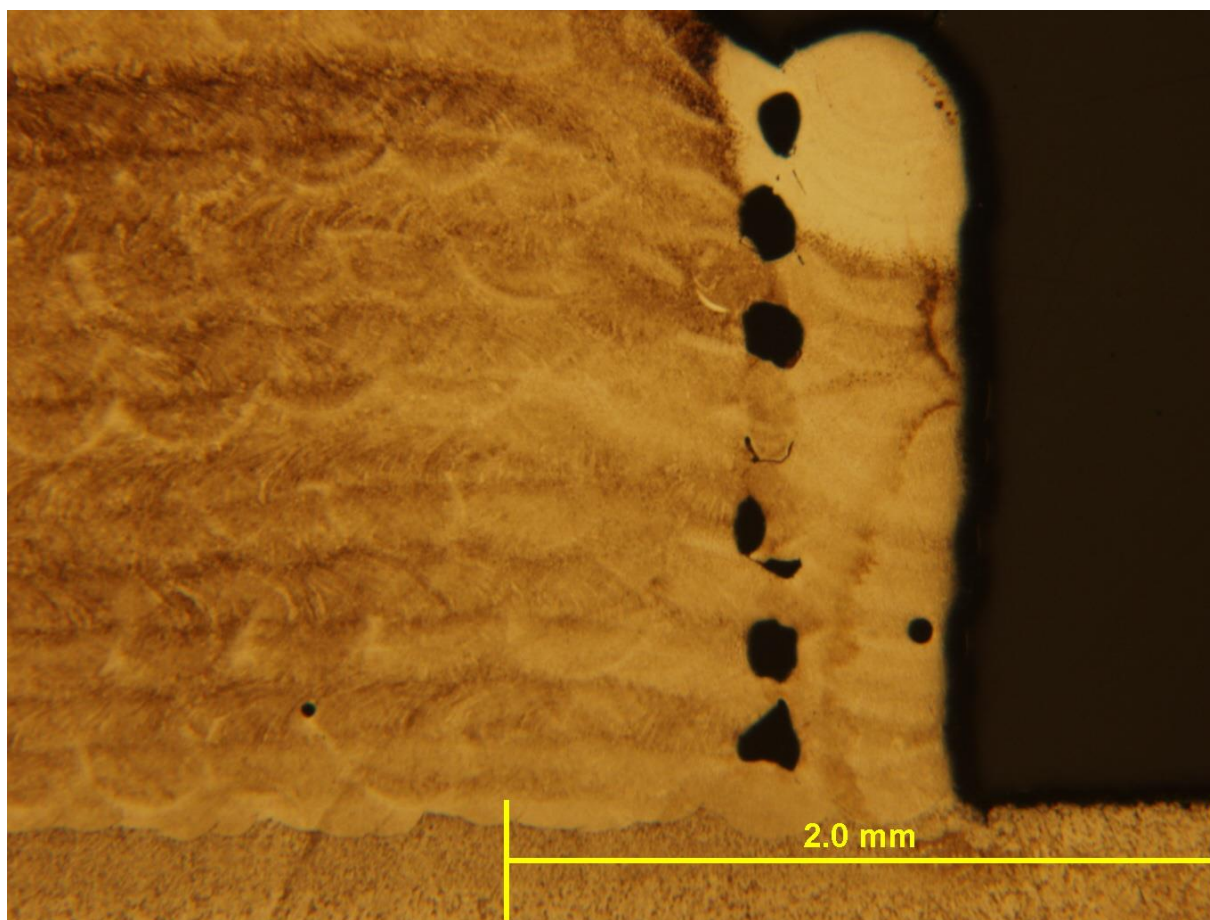


75. Ábra: Megfelelő felvitt réteg struktúra (Kód: P-LD-1-H13; Lézersugár teljesítmény $P=337,5$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

A mért forgácsoló erőben keletkező ugrást magyarázhatja az eltérő szövetszerkezet is. Amennyiben a marónak a forgácsolás megkezdésekor a világosabb területet -lásd. 60.-63. Ábra - kellett forgácsolnia, akkor a lágyabb ausztenit került lemunkálásra. Majd

mikor a maró belekezdett a sötétebb területbe, -feltételezésem szerint martenzitbe-, akkor a martenzit nagyobb keménysége miatt a forgácsoló erő is jelentősen megnövekedett. Ezt fokozza, hogy a mintadarabok szélén látható világos területeknek – ausztenit – sötét határvonaluk van, ami jelentős martenzit kiválásra enged következtetni.

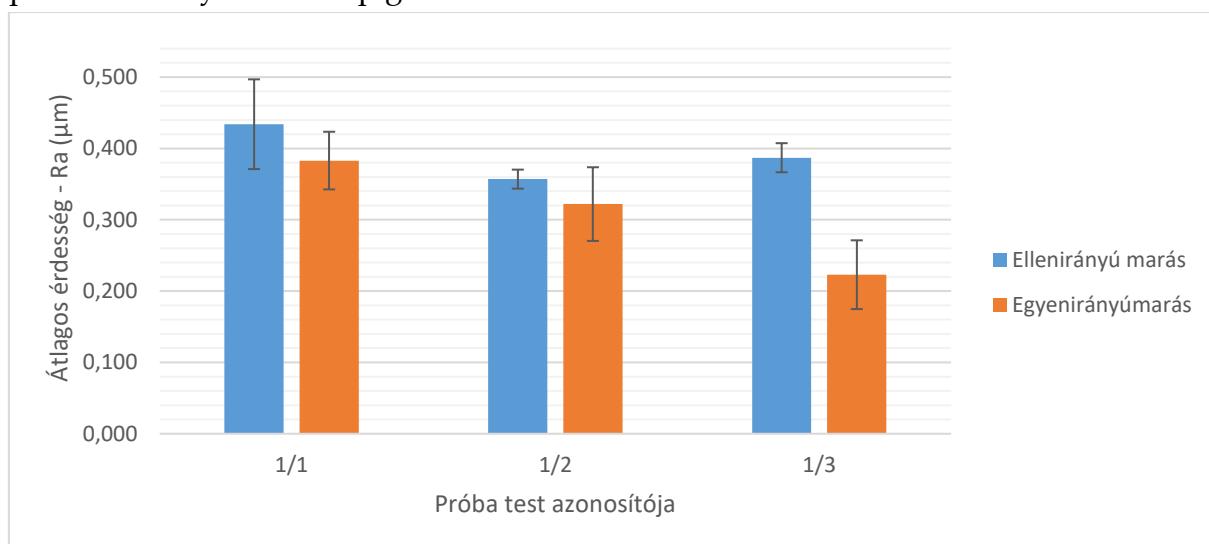
További magyarázatul szolgálnak a már korábban említett nem megfelelően megválasztott additív technológiai paraméterek miatt egyvonalban egymás alatt és fölött képződött lunkerek. Erre mutat egy kiváló példát a 76. Ábra. A forgácsoló erőben a bekezdéskor tapasztalható ugrást, majd a növekedést a lunkerek „felnyitása” jelenti. Ekkor a maró nem tömör, hanem porózus anyagot forgácsol, vagyis csökken a forgácsoló erő nagysága. Miután pedig a maró elhagyta a kontúr és az alaptest közötti lunkereket és már az alaptestet forgácsolta, a forgácsoló erő ismételt növekedésnek indult.



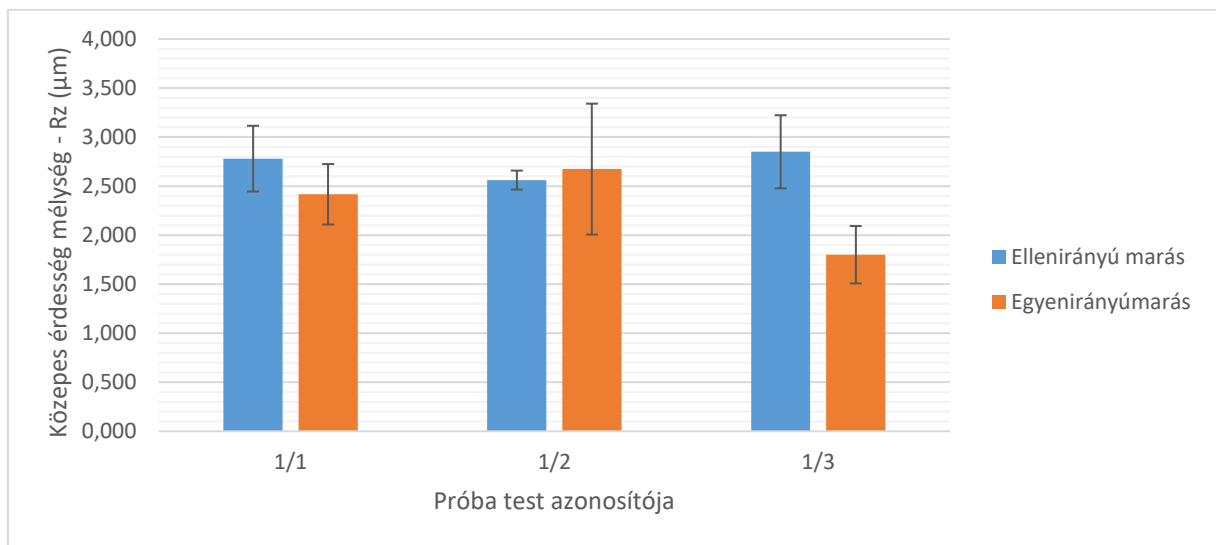
76. Ábra: Jelentős lunker képződés a kontúr és az alaptest határán (Kód: P-LD-4-H13; Lézersugár teljesítmény $P=270$ W; pásztázási sebesség $v=5$ mm/s; Lézersugár átmérő $d=0,74$ mm; Rétegvastagság $LH=200$ μ m; Vonalköz $VK=0,74$ mm; Átfedés $OL=50$ %)

3.2.4.2. Felületi érdesség mérése és a forgácsolt felület elemzése

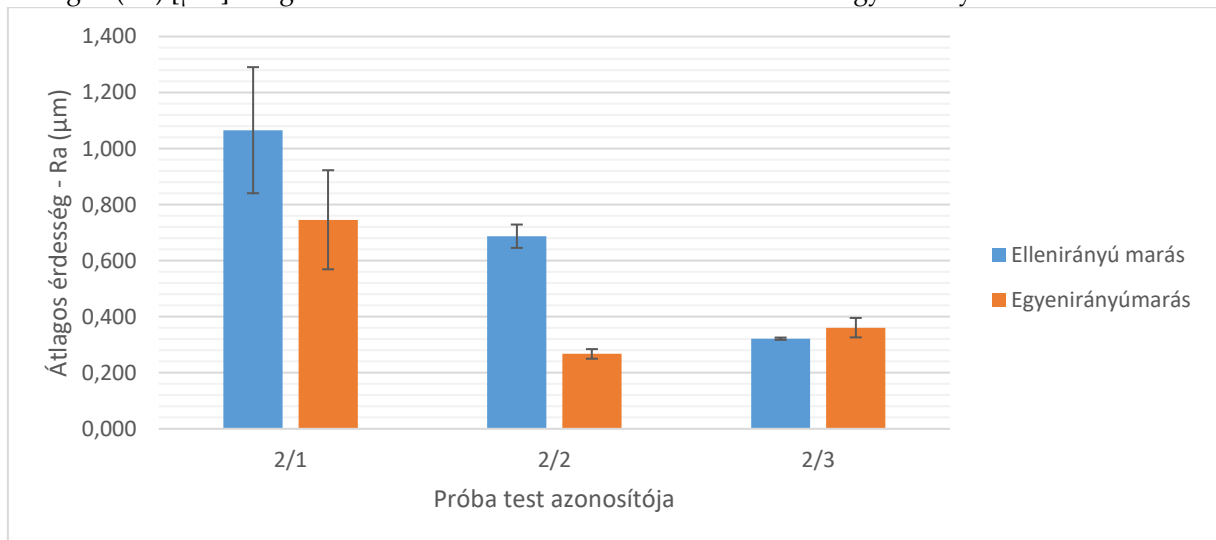
A forgácsolt felületi érdességének a mérését egy Mitutoyo Surftest SJ-401 Típusú metszet tapintóval végeztem el. Egy adott forgácsolt felületet háromszor tapogattam le, az előtolás irányában, a metszet tapintó által mért értékeket – Átlagos felületi érdességet (Ra) és Közepes érdesség mélységet (Rz) - pedig excel táblába jegyeztem fel. Az így kapott mérési adatokat a 7.9. Mellékletben csatoltam. Mindegyik forgácsolt felületet egy egyedi azonosítóval láttam el a későbbi megkülönböztetés céljából: „Próbatest alaplapijának a sorszáma – Additív úton gyártott próbatest sorszáma az adott alaplapon – Marástípusa”; ha a marás ellenirányú marás volt, akkor az azonosító utolsó száma 1; ha egyenirányú marás volt, akkor 2. Meghatároztam az egy forgácsolt felületen mért felületi érdesség mérő számok átlagát és szórását az Excel program beépített függvényei segítségével. A kapott eredményeket is a 7.9. Mellékletben csatolom. A kapott eredményeket oszlop grafikonon is ábrázoltam:



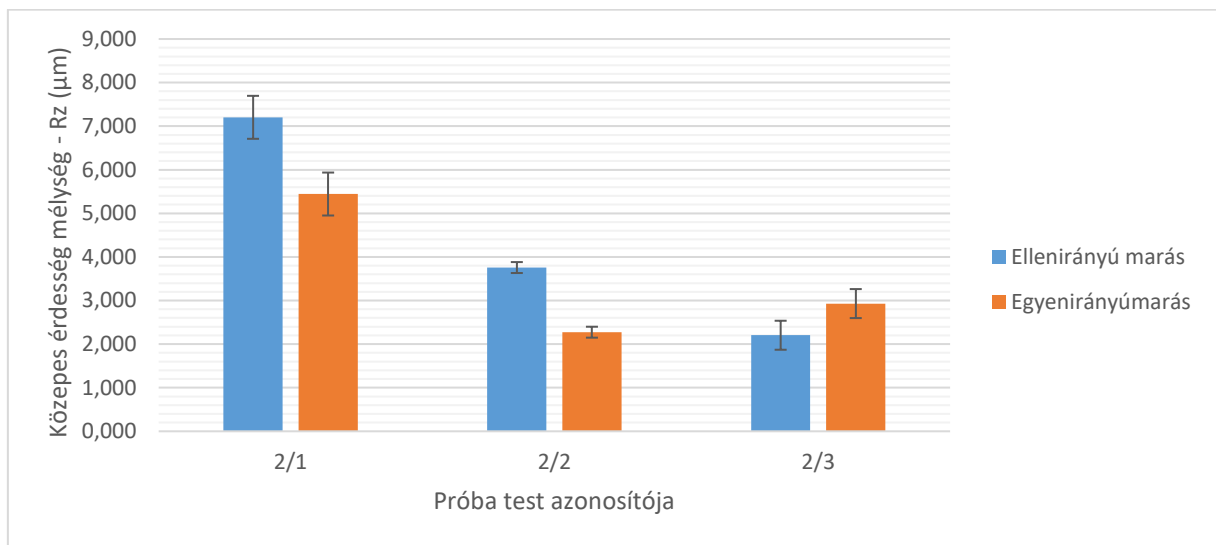
77. Ábra "1"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



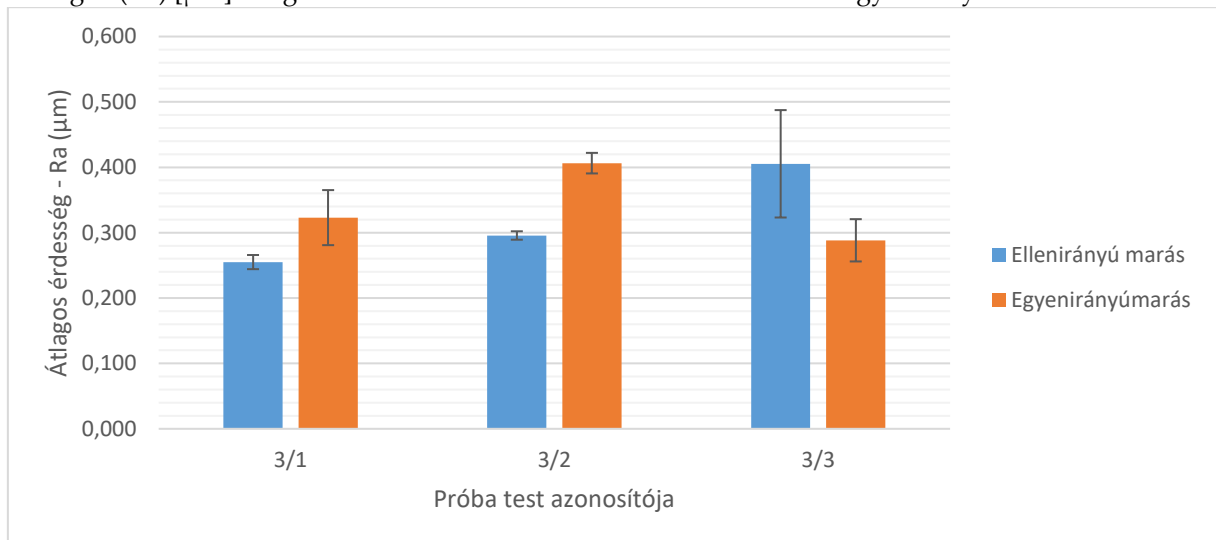
78. Ábra: "1"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért közepes érdesség mélységek (Rz) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



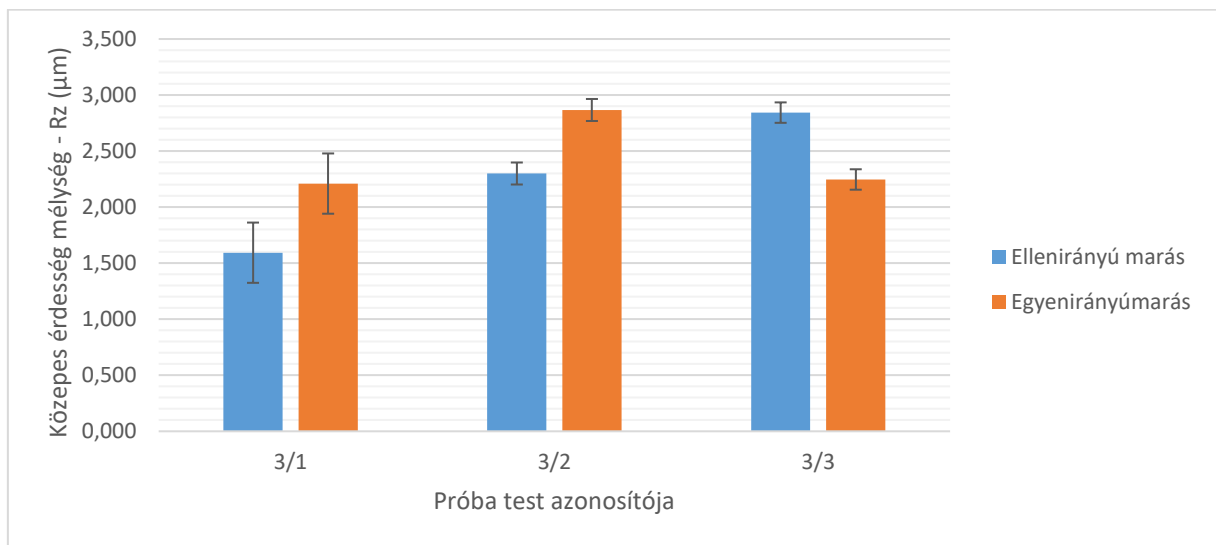
79. Ábra: "2"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



80. Ábra: "2"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért közepes érdesség mélységek (Rz) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében



81. Ábra: "3"-as jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.

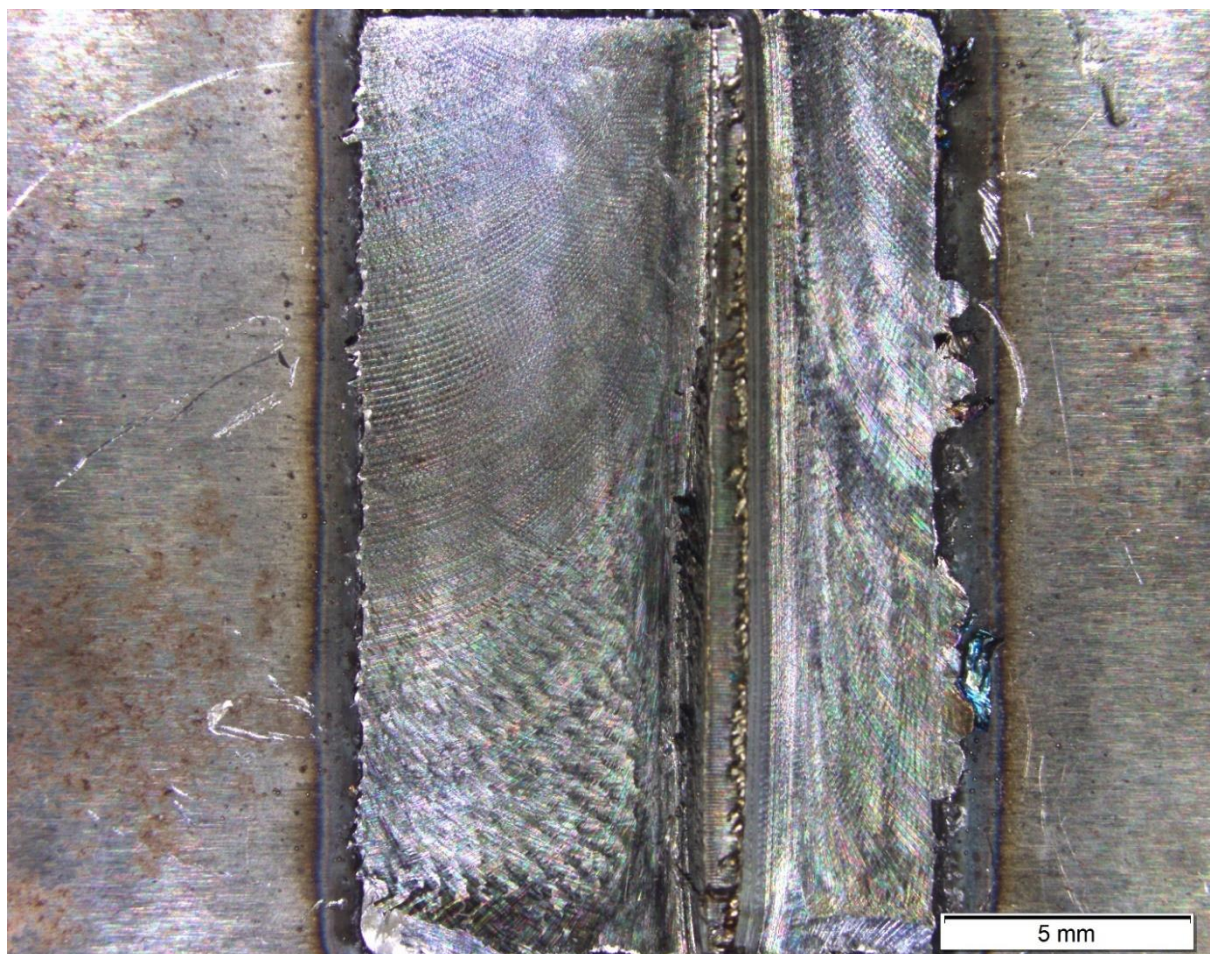


82. Ábra: "3"-as jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért közepes érdesség mélységek (R_z) (μm) átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.

A forgácsolt anyag a nehezen forgácsolható melegalakító szerszámacél volt, mely nagy keménységgel rendelkezik. Éppen ezért a vizsgálatom során az alkalmazott szerzámlapka forgácsoló éle jelentős mértékű kopást szenvedett el. Olyan mértékben, hogy lapka cserére is szükség volt az „1”-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolása után.

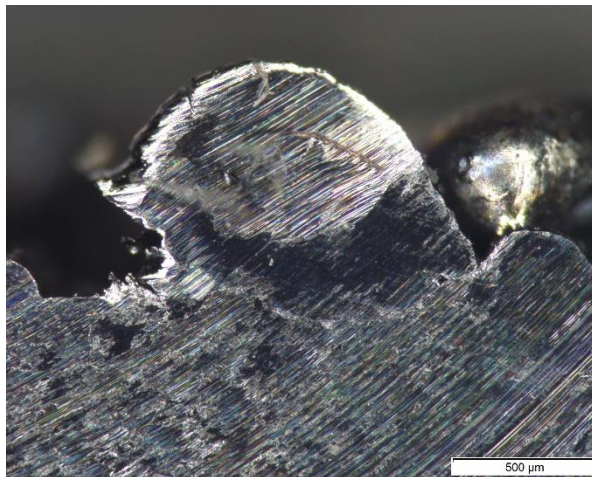
A legjobb felületi minőséget a „1/3”-as próbatest egyenirányú marása során sikerült elérni, ekkor az adott felületen mért Átlagos érdességek átlaga $R_a=0,223\mu\text{m}$ volt, a fogankénti előtolás $f_z = 0,04 \text{ mm/ford}$; forgácsoló sebesség $v_c = 170 \text{ m/perc}$ volt.

Minden forgácsolt felületről készítettem mikroszkópos felvételt egy Olympus SZX16 sztereó mikroszkópon. Ezeket a képeket a 7.12. sz. Mellékletben csatoltam.

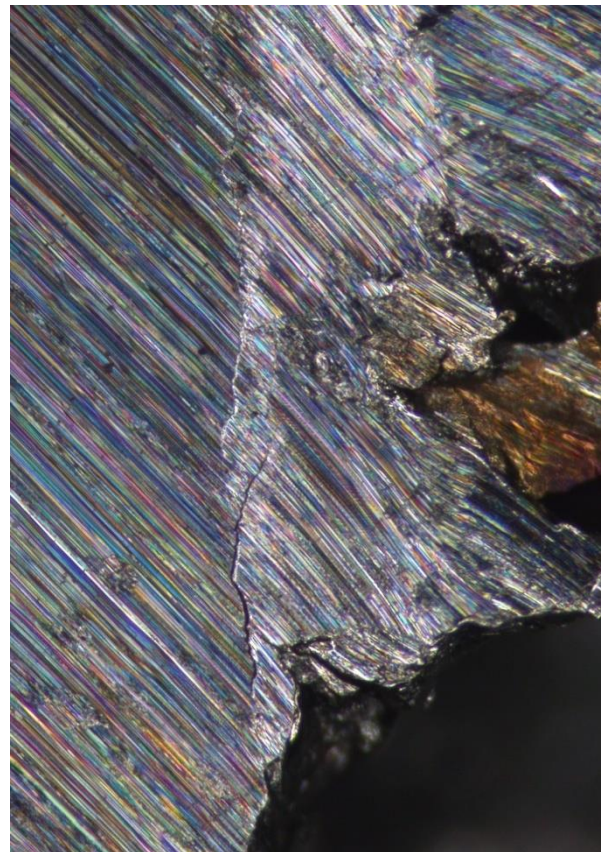


83. Ábra: "3/3"-as jelű próbatest forgácolt felületeiről készült mikroszkópos kép

A 83. Ábrán megfigyelhető az ellenirányú marás esetében a felület mintázatának megváltozása. Ennek a magyarázata a szerszám rezgésének növekedése lehet – melyet később a 7.13. sz. Mellékletben található 18. Mérés során kapott forgácsoló erőket ábrázoló grafikon is igazol -, ugyanis a mikroszkópi képek alapján a „3/3”-as próbatest homogenitása megfelelő mértékű, porozitás nem látható rajtuk. A keménységek nem mutatnak kiugróan magas eltérést a megváltozott mintázatú területen. A keménység mérések alapján kijelenthetem, hogy az additív gyártott próbatestek nagy keménységgel rendelkeznek. Ebből kifolyólag a szerszám nagymértékű kopást szenvedett a forgácsolás alatt. Valószínűleg a szerszám kopásával magyarázható a 83. Ábrán látható különbség a felület mintázatában.

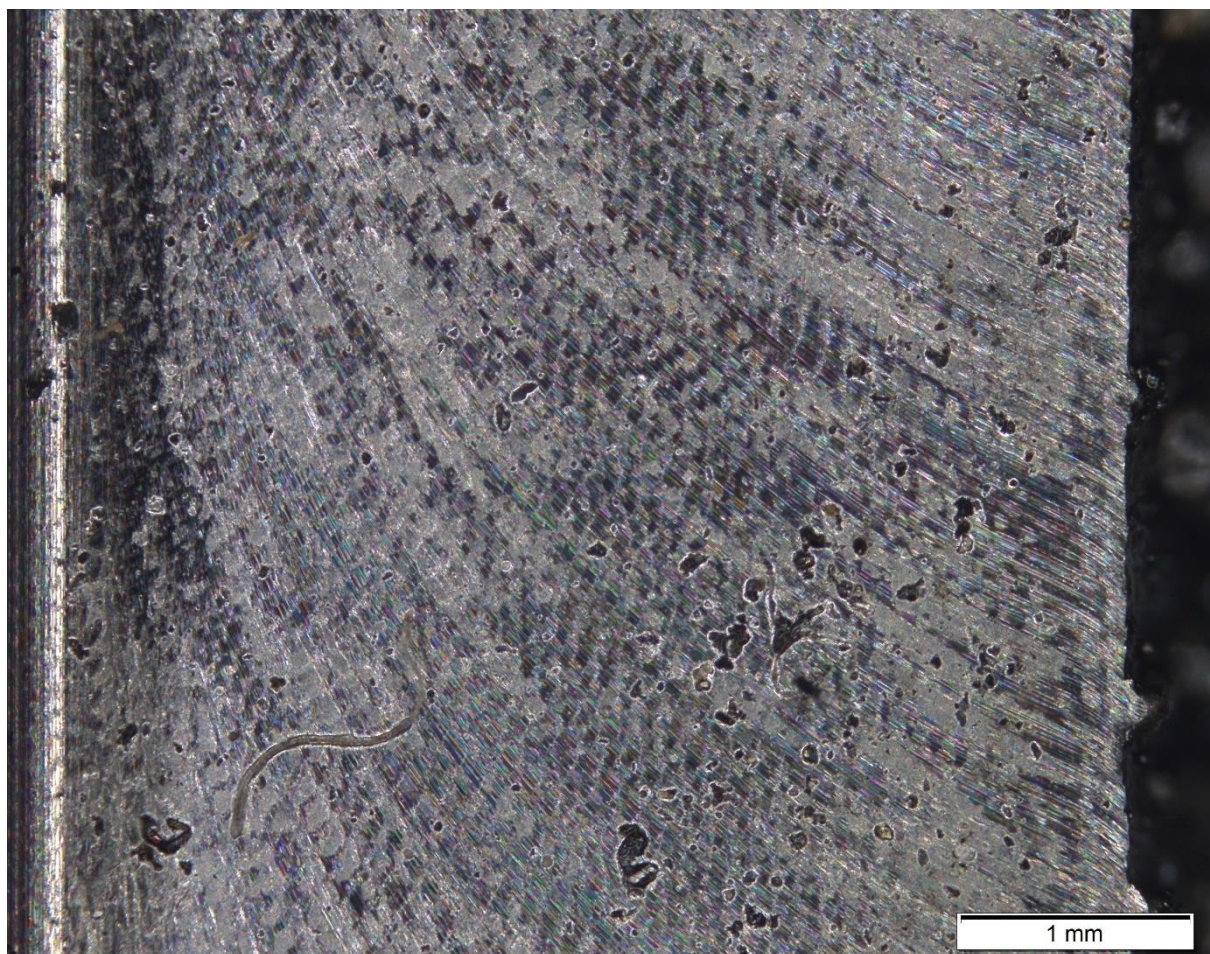


84. Ábra: Keresztül mart fröcskölődés az "1/2"-es
próbatest felületén



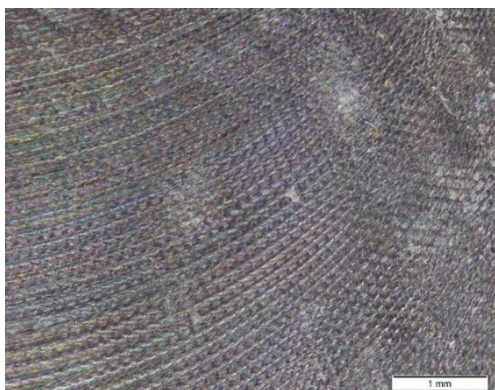
85. Ábra: Keresztül mart fröcskölődés a "3/3"-as
próba test felületén

Jelen vizsgálat során alkalmazott additív technológia lézersugaras felrakó hegesztés. A különböző hegesztési eljárások során jól ismert jelenség a fröcskölődés, ez a jelenség az általam vizsgált próbatesteken is tetten érhető. A 84. és 85. Ábrán láthatók a mintadarabok oldalán keletkezett fröcskölődések mikroszkópi képei. A 85. Ábrán jól látható a határvonal az alapanyag a rá fröcskölődött anyag között, illetve a határvonal mentén kialakult repedés.



86. Ábra: Porozitások a „2/2”-es próbatestben

Elmondható, hogy habár az általam alkalmazott technológiai paraméterek a gyártás során minden próbatest esetében megegyeztek, sajnos a külső körülményeket (hőmérséklet, páratartalom) nem állt módomban szabályozni. Ennek sajnos a gyártott mintadarabok homogenitása közti jelentős különbség lett az eredménye. A 86. Ábrán jól látható a mintadarab nagyfokú porozitása. Míg a 87. Ábrán látható „2/1”-es próbatest nem mutatja a porozitásnak ilyen magasfokú mértékét, éppen ellenkezőleg, az anyag magasfokú homogenitással rendelkezik a mikroszkópi képek alapján. A „2/1”-es és „2/2”-es – „2/3”-as próbatest a gyártás magas ideje miatt két különböző munkanapon készültek, amikor értelemszerűen a csarnokban, -ahol a hegesztő berendezés megtalálható-, más körülmények uralkodtak.



87. Ábra: Porozitás mentes "3/3" - as próbatest

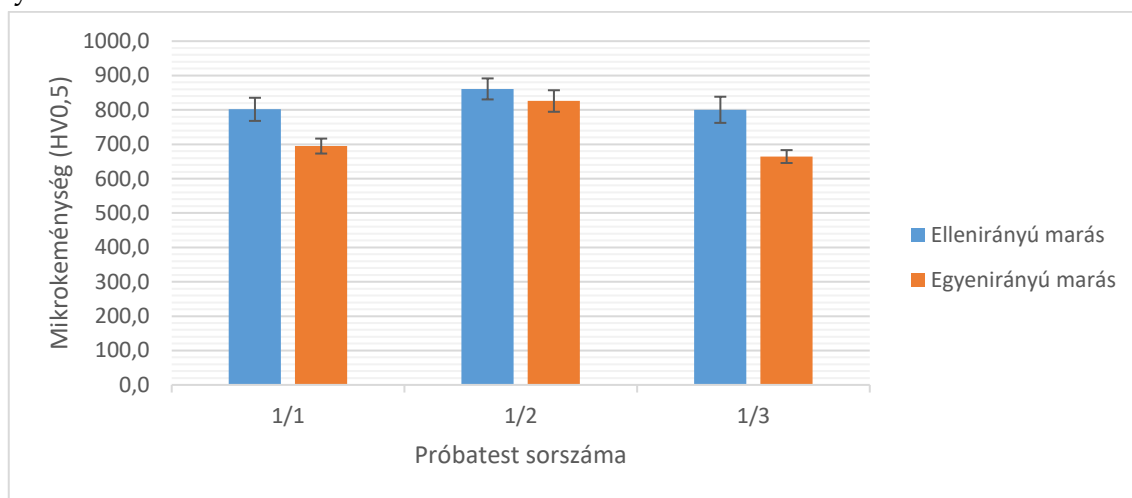


88. Ábra: Magas fokú porozitással rendelkező "2/2"-es próbatest

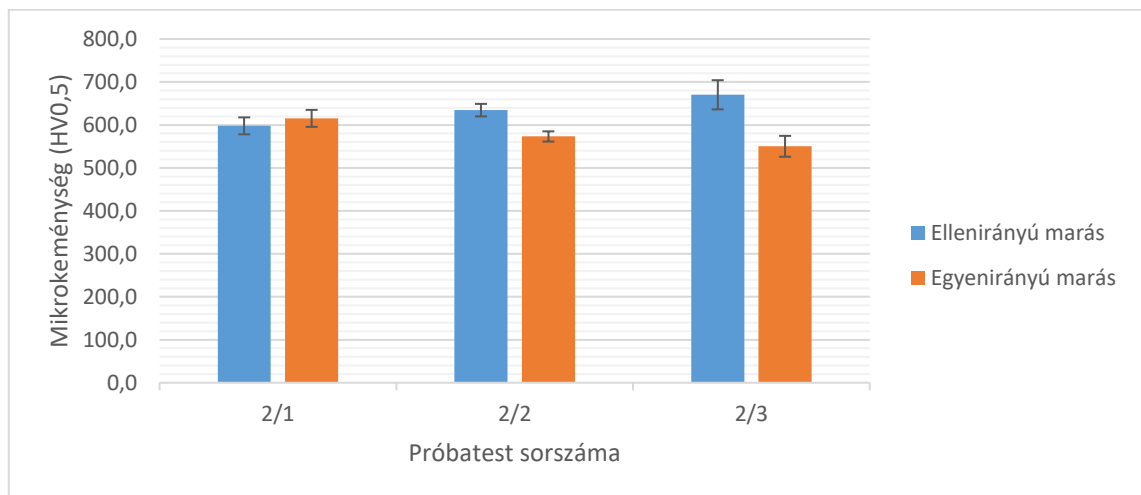
3.2.4.3. Mikrokeménység mérés a forgácsolt felületeken

A mikrokeménység mérését egy Buehler Indentamet 1100 mikrokeménységmérő berendezésen hajtottam végre közvetlenül a forgácsolt felületen, 500 grammos terhelés mellett 11 másodperces „dwell time” alatt. Egy forgácsolt felületen tetszőlegesen 10 pontban mértem az anyag keménységét, Vickers keménységben. Adott felületen mért keménységeknek meghatároztam az átlagát és a mért adatok szórását. Az így kapott mért és számolt adatokat a 7.10. Mellékletben csatoltam. A mért keménységeket grafikusán is ábrázoltam. Ezen oszlopdiagramokat a 7.11. Mellékletben csatoltam.

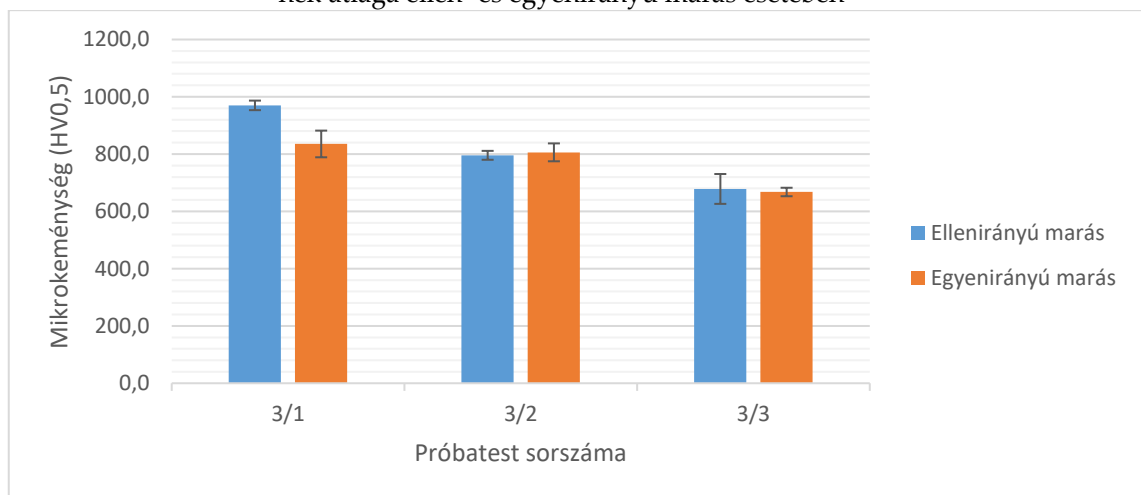
Az így kapott átlagokat oszlop diagramokon ábrázoltam – külön az egyen- és ellenirányú marásokat – feltüntetve a mért adatok szórását.



89. Ábra: "1" -es jelű alaplagra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyen irányú marás esetében



90. Ábra: "2"-es jelű alaplapra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyenirányú marás esetében



91. Ábra: "3"-as jelű alaplapra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyenirányú marás esetében

A keménység mérés alapján megállapítható, hogy az additív technológiával gyártott próbatestek keménysége nagy. A próbatestek átlagos keménysége 712 HV_{0,5} volt, ami már az edzett anyagok közé sorolható. A „2”-es és „3”-as jelű alaplap esetében a mért keménységek átlaga ellenirányú marás esetén nagyobb forgácsolási sebesség esetén növekvő, míg egyenirányú marás esetén csökkenő tendenciát mutat. Azonban ez a tendencia nem általános, mert az „1”-es jelű alaplapon mért keménységek esetében ez nem figyelhető meg. Ez is mutatja a próbatestek gyártáshoz használt additív technológia nem kielégítő ismétlési pontosságát. A mérési eredmények megfelelnek Lizzul, Sorgato és társaik [11] által kapott eredményeknek. Az additív technológiával gyártott AISI H13-as anyagú mintadarabok keménysége nagymértékű inhomogenitást mutat, mely jelen alkalmazott technológia sajátossága, és ami a bevonatolás során elért különböző hőkezeltségi állapotokkal magyarázható.

4. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

4.1. Additív technológia esetén

A gyártott próbatestek magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebességének csökkentésével nő. A túlzottan nagy sebességnél a fej mozgása túl gyors, ezért kevés idő áll a fémpornak a rendelkezésére, hogy az olvadékba jusson, tehát csak vékony, kis vastagságú rétegek tudnak kialakulni és nem a kívánt réteggépződés történik. Túl alacsony sebesség és túl magas lézersugár teljesítmény esetén a darab jelentősen túllépi az előírt magasságot. Ez megfelel az [2] a szakirodalomban leírtaknak.

A gyártott próbatestek magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a lézersugár átmérőjének a csökkentésével nő, azonban ez csak egy bizonyos átmérőig igaz. Ugyanis, ha túl kicsi az átmérő, kis területen tudja a lézer az alapanyagot megolvasztani, ezért a rétegek vékonyak és inhomogének lesznek. Ez megfelel a [2] forrásnak.

A gyártott próbatestek magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a rétegvastagság csökkentésével nő. Adott pásztázási sebesség mellett a rétegvastagság csökkentésével a gyártási idő jelentős mértékben nő, így a gazdaságosság érdekében nem célszerű túlzottan vékony rétegekkel dolgozni. Túlzottan vastag rétegek esetén nem tudnak a rétegek rendesen kialakulni, így a darab magassága sem lesz megfelelő. Rétegről rétegre egyre kevesebb por jut az olvadékba, így a fej és a darab közti távolság, -melynek állandónak kellene lennie a folyamat során -növekszik.

A gyártott próbatestek magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a vonal átfedésének a növelésével nő. A magasság ezzel a megoldással nagymértékben növelhető, azonban a gyártási idő is megnövekszik. Túlzottan nagy átfedés esetén a darab magassága jelentősen meghaladja az előírtat, gyakran több milliméterrel is.

Az AISI H13-as fémporból készült mintadarabok csiszolatainak mikroszkópi felvételein mindig egy sötét és egy világos fázis különíthető el. Véleményem szerint a világosabb terület maradék ausztenit, míg a sötét martenzit. Ezen kijelentésem egybe vág a nemzetközi szakirodalom [9,10,11] megállapításaival.

Vizsgálataim alapján az AISI H13-as melegalakító szerszámacél esetében a 12. Táblázatban található paramétereket ajánlom. A 15-5PH korrozióálló acél esetében pedig a 16. Táblázatban láthatóak.

16. Táblázat: 15-5PH melegalakító szerszámacél optimális additív technológiai paraméterei.

Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Spot Size (mm)	Rétegvastagság (μ m)	Vonal vastagság (mm)	Overlap (%)	Hatch distance (mm)
62,5%	281,25	5	0,74	200	1	50%	0,5

4.2. Forgácsolhatósági vizsgálatok eredményei

A mért, majd az alkalmazott programmal transzformált értékekből megállapított determinációs együttható (R^2) értéke (ellenirányú marás esetében $R^2=0,998970925$; míg egyen irányú marás esetében $R^2=0,999968002$) alapján kijelenthetem, hogy a regressziós modell kielégítő mértékben írja le a mérésből származó pontok átlagos viselkedését.

Az így kapott fajlagos forgácsoló erőket összehasonlítva a Csepeli Szerszámgépgyár által leggyakrabban megmunkált S235JR és C45-C45E anyagok fajlagos forgácsoló erejével megfigyelhető ellenirányú marás esetében, hogy a felrakott H13-as anyag nagymértékű inhomogenitása miatt bizonyos esetekben ezen anyag fajlagos forgácsoló ereje meghaladja a C45-ét, míg más mérések esetében csak az S235JR fajlagos forgácsoló erejét és a C45E fajlagos forgácsoló erejével van egy szinten.

A forgácsolt felületeken mért mikrokeménység nagy szórást mutatott. A mikrokeménység értéke jellemzően 500HV_{0,5} és 1000HV_{0,5} között mozgott. Ez az alkalmazott additív technológiára jellemző, a gyártás folyamata közben fellépő ismétlődő hőkezeléssel magyarázható, mely inhomogén anyagszerkezetet eredményez. A mérési eredmények megfelelnek Lizzul, Sorgato és társaik [11] által kapott eredményeknek.

Összeségében megállapítható, hogy a rendelkezésre álló szerszámmal jó minőségű felületet sikerült elérni. $f_z = 0,16 \text{ mm/ford}$ előtolás esetén sikerült a $R_a=0,8 \text{ }\mu\text{m}$ -es érték alatt stabilan gyártani, ami hagyományos szemlélettel nézve köszörült felületnek felel meg. A rendelkezésre álló szerszámmal sikerült Lizzul, Sorgato és társai [11] által kapott felületi érdességektől (két felvitt réteg esetén $R_a=11,96\pm0,67 \text{ }\mu\text{m}$; 5 felvitt réteg esetében $R_a=9,57\pm0,53 \text{ }\mu\text{m}$) nagyságrendekkel jobbat előállítani.

4.3. Javaslatok/Következtetések/Tanulságok

A vizsgálataim során egyértelműen megállapítható, hogy a lézersugaras bevonatolással gyártott próbatestek magas fokú inhomogenitással rendelkeznek. Ezt igazolja a nagymértékű szórás a mért mikrokeménységben és a forgácsoló erők mérésének a kiértékelése is, illetve a szakirodalom is ezt támasztja alá. [8] Ezen inhomogenitás tetten érhető a forgácsolóerő kiértékelése során meghatározott fajlagos forgácsoló erőkön is. Az additív úton gyártott anyag nagymértékű inhomogenitása részben magyarázható a kialakult anyagszerkezettel. „Az alkalmazott technológiára jellemző az úgynevezett „intrinsic” hőkezelés. Ennek során a korábban felvitt rétegek ismétlődő melegítésnek vannak kitéve az újonnan felvitt rétegek által. Ez a jelenség az AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél mikroszerkezetére komoly hatással van.” [15] Az inhomogén anyagszerkezet miatt a szerszám nagymértékű kopásnak volt kitéve, ezt a tény az ilyen módon gyártott anyag jövőben történő forgácsolása esetén szem előtt kell tartani. A forgácsolhatóság szempontjából kedvezőtlen inhomogén mikrostruktúra az additív úton gyártott „nyers” darab megfelelő hőkezelésével mérsékelhető vagy megszüntethető. Véleményem szerint a Csepeli Szerszámgépgyár Kft. számára a jövőben a sikeres gyártás érdekében ilyen irányú vizsgálatok (additív úton gyártott és különböző módon hőkezelt darabok forgácsolhatóságának vizsgálata) alapvető fontosságúak. Ugyanakkor az anyagszerkezetben tapasztalt nagymértékű inhomogenitás magyarázható az additív gyártás nem megfelelő külső körülményeivel. A csarnokban, melyben a gépet üzemeltetik nem lehetséges az állandó hőmérséklet és páratartalom fenn tartása, melyek jelentős hatást gyakorolnak a lézersugaras bevonatolás folyamatára. Az állandó hőmérséklet és páratartalom biztosításával az adott anyag additív technológiai paramétereinek optimalizálását nagymértékben könnyíteni lehetne, illetve csökkenteni lehetne az inhomogenitás mértékét. Véleményem szerint, ha a külső körülmények állandók lennének a gép hosszútávú üzemeltetése során, az magával vonná a lézersugaras hegesztő berendezés ismétlési pontosságának javulását is.

5. IDÉZETT FORRÁSMUNKÁK

1. **Halász, Gábor.** A fém additív gyártás - úton a digitális sorozatgyártás felé I. rész. *Hegesztéstechnika*. 2020.
2. **Mahamood, Rasheedat Modupe.** *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*. Johannesburg : Springer Vieweg GmbH, 2018. ISBN 978-3-319-64984-9.
3. **Robert Bernhard, Philipp Neef, Henning Wiche, Volker Wesling, Christian Hoff, Jörg Hermsdorf, Stefan Kaierle.** *Laser Cladding - Additive Manufacturing*. [szerző] Pasquale Cavaliere. *Laser Cladding of Metals*. Cham, Svájc : Springer Nature Switzerland AG, 2021.
4. **P. Cavaliere, A. Silvello.** *Laser Cladding: Fatigue Properties. Laser Cladding of Metals*. Cham, Svájc : Springer Nature Switzerland AG, 2021.
5. **Mahamood, Rasheedat & Akinlabi, Esther.** Effect of laser power on surface finish during laser metal deposition process. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. 2014., 2. kötet.
6. **Gharbia M, Peyrea P, Gornya C, Carinb M, Morvilleb S, Le Massonb P, Carronb D.,** Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy. *Journal of Material Process Technology*. 2014., 214. kötet.
7. **Ravi GA, Qiu C, Attallah MM.** Microstructural control in a Ti-based alloy by changing laser processing mode and power during direct laser deposition. *Materials Letters*. 2016., 179. kötet.
8. **Balázs, Dr. Varbai.** *Kristályosodás. Anyagtudomány és Technológia Tanszék*, Budapest : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2021.
9. **J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, D. Hetzner.** The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1997., 49. kötet.
10. *Additive manufacturing of tool steel by laser metal deposition.* **A. Bohlen, H. Freiße, M. Hunkel, F. Vollertsen.,** hely nélk. : Procedia CIRP, 2018. ISSN 2212-8271.
11. **Lucia Lizzul, Marco Sorgato, Rachele Bertolini, Andrea Ghiotti, Stefania Bruschi, Francesco Fabbro, Silvano Rech.** On the influence of laser cladding parameters and number of deposited layers on as-built and machined AISI H13 tool steel multilayered claddings. *Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021., 35.
12. **X.D. Nong, X.L. Zhou.** Effect of scanning strategy on the microstructure, texture, and mechanical properties of 15-5PH stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Characterization*. 2021., 174. kötet.
13. *Effects of geometry, location, and direction on microstructure and mechanical properties of 15-5PH stainless steel fabricated by directed energy deposition.,* **X.D. Nong, X.L. Zhou,**

Y.D. Wang, L. Yu, J.H. Li. 821, hely nélk. : Materials Science and Engineering, 2021., A. kötet. ISSN 0921-5093.

14. Gebhardt, Andreas. *Additive Fertigungsverfahren*. ötödik. Kösel : Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN.

15. CNC Media. [Online] [Hivatkozva: 2021. szeptember szeptember.] <https://www.cnc.hu/2016/02/sokoldalul-lrs-evo-diodeline-diode-gerjesztesu-lezer-az-or-laser-tol/>.

16. Christoph Leyens, Frank Brückner, Elena Lopez, Mirko Riede. *Successes and Challenges of SLM and LMD for Industrial Production*. Laser Additive Manufacturing Conference, Drezda : Additive Manufacturing Centre Dresden, 2017.

17. Dr. Biró István, Dr. Czampa Miklós. Marás erőmérésének statisztikai alapú kiértékelése. *Egyetemi Laborgyakorlat Silabusz*. Budapest : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és Technológia Tanszék, 2019.

18. Frischherz, Adolf, és mtsai. *Fémtechnológiai Táblázatok*. Gyoma : B+V Lap és könykiadó Kft., 1997.

19. Thomas Apprich, Josef Brenner, Michael Dambacher, Franz Dreher, Georg Fischer, Gerd Greiner, Burkhard Heine, Armin Hochstatter, Sven Holzberger, Fabian Holzwarth, Harald Kaiser, Thomas Liesch, Alexander Pflug, Dietmar Schmid, Taghi Tawakoli. *Tabellenbuch für Zerspantechnik*. Haan-Gruiten : Europa-Lehrmittel, 2018. ISBN 978-3-8085-1576-1.

20. [Online] <https://www.or-laser.com/en/lasersystems/lrs-evo/#id2-tab>.

21. [Online] IC-Hungary Kft-, 2016.. február 16. [Hivatkozva: 2021.. április 26.] <http://www.gyartasmonitor.hu/hegesztes/optimalizalt-lezerhegesztes-20160213>.

22. LRS EVO DIODELINE - Operating Instruction. Dieburg : O.R. Lasertechnologie GmbH, 2014. LRS-D 450192101.

23. metalprinting.hu. [Online] [Hivatkozva: 2020.. December 11.] <http://www.metalprinting.hu/technologia/>.

24. Backes, Gerhard. *Additive Manufacturing - Herausforderungen und Lösungen*. Aachen : LLT-RWTH Aachen.

25. Halász, Gábor. *Új dimenzióban az additív gyártás*. Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2020.

26. Dietrich, Jochen. *Praxis der Zerspantechnik*. Drezda : Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-14052-6.

6. SUMMARY

Nowadays the additive manufacturing is one of the most dynamically expanding manufacturing processes. The industrial application of this process constantly growing because of the unique advantages of this manufacturing process, which are the following: the possibility to make free form, strain optimised part cost and material effective, which with other manufacturing process not possible. Another big advantage of this process is the repairing of damaged tools, which with the other processes is not possible. Because of this many advantages the Csepel Machine Tool Ltd. will build an “additive” automated manufacturing system. This system contains a laser beam welding machine which is capable of additive manufacturing – laser metal deposition. My task was to determine an additive and machining process parameters, with the optimal production is possible. During my study I used two types of metal powder for the determination of additive manufacturing process parameters: 15-5PH stainless steel and AISI H13 hot working tool steel, but only the last were used for machinability studies, because I run out of the stainless-steel metal powder. First, I studied the national and international literature, to get basic knowledge in this theme. After that I make a measure plan for both the additive manufacturing and the machining. Then I made test samples with different additive process parameters (Laser Power, Beam Diameter, scanning velocity, Layer height and overlap), to choose the best and see what kind of effect has the different process parameters. I always modify only two parameters at one sample part. With the best parameter groups, I manufactured samples later on this sample was made the measurement of machining forces. After that I measured the surface roughness and hardness of the machined surface. The hardness is between 500 HV_{0,5} and 1000 HV_{0,5}; the surface roughness is between 0,3 µm and 1,4 µm, this is a very good surface quality. During the machining I measured the X-, Y-, and Z- Force component. I made the force transformation with an already existing program, which was made by Dr. Biró István for one of university subject. I make an Analysis of Variance – ANOVA – analysis and fit a regression curve to the data. According to these my force measuring, and transformation was good. I determined the specific cutting force - k_c – and compared with the values of k_c of the same and different materials. I could successfully determine the optimal process parameters for the production. I have to bring the inhomogeneity, which the typical characteristic of the laser metal deposition - of the “raw” (not heat-treated) additive manufactured part according to international literature. So, the heat treatment of the additive manufactured parts is essential before the machining.

7. MELLÉKLETEK

7.1. Melléklet: 15-5PH korrózióálló acél adatlapja



Designed for Processing in Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB) or Directed Energy Deposition (DED) Systems

MetcoAdd™ 15-5PH-A and 15-5PH-B are martensitic, precipitation-hardening stainless steel alloy products with chemistry similar to AMS 5659.

Room temperature static properties of PBF-LB processed and heat treated material coupons have been shown to be comparable to those of AMS 5659 in the H900 state.

For reference purposes Oerlikon has processed MetcoAdd 15-5PH-A using fixed parameters and 40 µm layer thickness to provide data below. Additional testing has been performed by an extensive network of consortia and customer partners on a broader range of machine types. Properties may be optimized based on application specific requirements.

Applications

- Tools and dies
- Plastic injection molds
- Aerospace
- Chemical and food processing
- Nuclear and oil / petrochemical refining
- Surgical parts

Typical Post Heat Treatment Properties (15-5PH-A) [1][2][3]

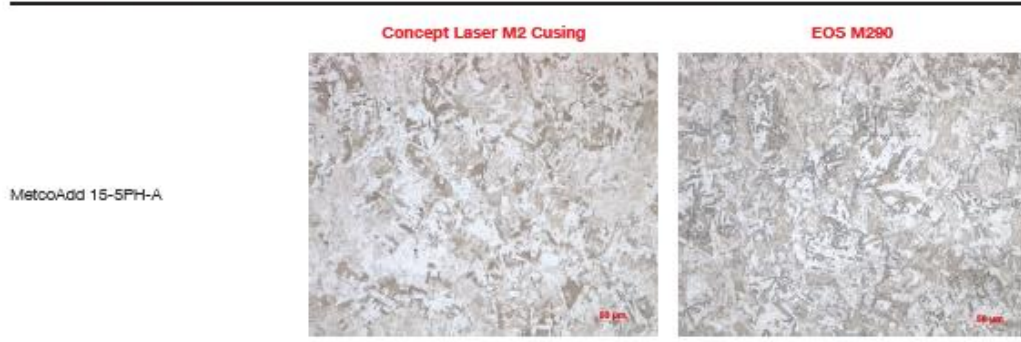
	Concept Laser M2 Cusing	EOS M290	Test Method
Ultimate Tensile Strength (MPa), XY/Z	1337±9 / 1334±2	1349±5 / 1354±4	ASTM E8
Yield Strength (MPa), XY/Z	1205±12 / 1206±5	1224±4 / 1235±5	
Elongation at break %, XY/Z	14±1 / 12±1	14±1 / 12±0	
Hardness (VHN _{0.05})	426±7	426±6	ASTM E384-17
Relative Density %	>99.9%	>99.7%	Internal Spec.

[1] Disclaimer: All data published in this datasheet has been shared for reference purposes only and is not sufficient to design or certify parts. No warranty or guarantee is made against these results.

[2] Bounds are based on one standard deviation of each population with ten samples per orientation and machine. Test specimens were 6.35 mm diameter round bars machined from coupons (75x75x13mm). Direction XY data is an average of both X and Y horizontal build orientations.

[3] Argon atmospheric HT: Solutionize at 1900 °F (1038 °C) for 1 hr. Air cool. Age at 900 °F (482 °C) for 1 hr.

Post Heat Treatment Microstructure (x 20 magnification, Vertical Build Direction)



Chemical Composition

	Weight Percent (nominal)					
	Fe	Cr	Ni	Cu	Nb	C
MetcoAdd 15-SPH Series	Balance	14.5	4.5	3.5	0.3	≤ 0.07

Particle Size Distribution and Hall Flow

	Nominal Range [µm]	D90 [µm]	D50 [µm]	D10 [µm]	Hall Flow [s/50 g]
MetcoAdd 15-SPH-A	-45 +15	50	33	20	≤ 25
MetcoAdd 15-SPH-B	-90 +45	-	-	-	≤ 25

For the nominal range, particle size analysis 45 µm or above measured by sieve (ASTM B214), analysis below 45 µm by laser diffraction (ASTM C 1070, Microtrak). Fractional analysis (D90, D50, D10) are nominal values by laser diffraction. Hall flow (ASTM B213).

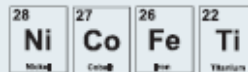
Product Information

Classification	Alloy, Iron Base
Chemistry	FeCrNiCu
Manufacture	Gas atomized (Argon)
Morphology	Spheroidal
Apparent Density	> 4.0 g/cm ³ (typical)
Melting Point	1420 °C / 2590 °F (typical)
Process	15-SPH-A: Laser Powder Bed Fusion (LPBF-LB) 15-SPH-B: Directed Energy Deposition (DED)
Safety Data Sheet	50-1953 www.oerlikon.com/metco
Package size	15-SPH-A: 4.5 kg / 10 lb approx. (stock) 15-SPH-B: 4.5 kg / 10 lb approx. (special order)
Distribution	Global
Order No.	15-SPH-A: 1100782 15-SPH-B: 1100783

Usage Recommendations

- Blend contents prior to use to prevent segregation
- Keep in the original container, or an approved alternative, tightly closed when not in use
- Powder from previously opened containers should be stored in a humidity-controlled environment

oerlikon
am



**AM Metal Powder
Portfolio**

Check our full portfolio at <https://www.oerlikon.com/am/en/offerings/metal-powders> or contact us at am@oerlikon.com

We have a broad range of existing alloys, supported by ongoing development. We also know that current off-the-shelf solutions in AM cannot answer every production need. Our R&D teams can rapidly design, optimize, and produce new and custom alloy chemistries for pilot atomization and AM validation in our production facilities.

www.oerlikon.com/am

© Oerlikon AM | OAM_15-SPH Stainless Steel_DS_1901

7.2. Melléklet: AISI H13 megalakítószerszám acél adatlapja



Designed for Processing in Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB) or Directed Energy Deposition (DED) Systems

MetcoAdd™ H13-A and H13-B are martensitic, iron-chromium, air-hardenable steel powders powder products with chemistries similar to AISI H13, ASTM H13, SAE H-13 and Werkstoff No. 1.2344 / X40CrMoV 5-1-1.

Room temperature static properties of PBF-LB processed and heat treated material coupons have been shown to be comparable to those of AMS 6408.

For reference purposes Oerlikon has processed MetcoAdd H13-A using fixed parameters and 40 µm layer thickness to provide data below. Additional testing has been performed by an extensive network of consortia and customer partners on a broader range of machine types. Properties may be optimized based on application specific requirements.

Applications

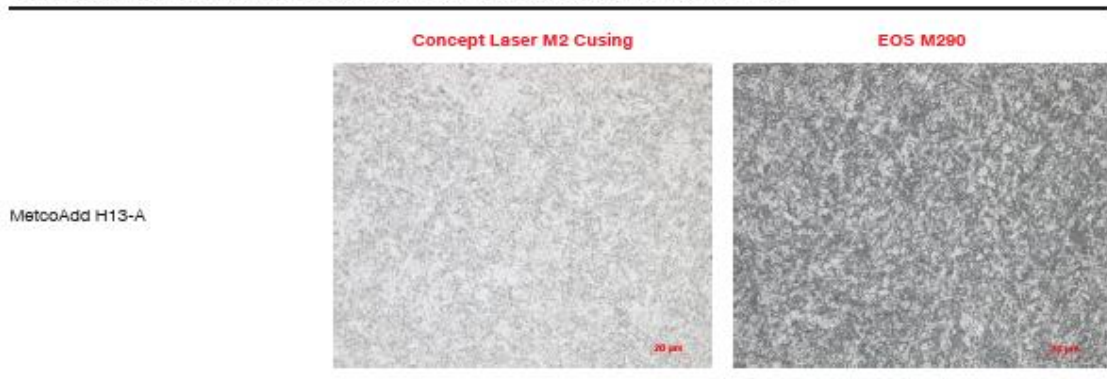
- Hot work dies for casting
- Casting dies for aluminum and magnesium
- Hot forging and stamping dies
- Hot shear blades
- Plastic injection molds

Typical Post Heat Treatment Properties (H13-A) [1][2][3]

	Concept Laser M2 Cusing	EOS M290	Test Method
Ultimate Tensile Strength (MPa), XY/Z	1894±12 / 1886±16	1899±7 / 1903±12	ASTM E8
Yield Strength (MPa), XY/Z	1512±14 / 1510±14	1531±37 / 1538±31	
Elongation at break %, XY/Z	10±1 / 10±1	11±1 / 11±1	
Hardness (VHN _{300g})	568±7	571±5	ASTM E384-17
Relative Density %	>99.8%	>99.9%	Internal Spec.

[1] Disclaimer: All data published in this datasheet has been shared for reference purposes only and is not sufficient to design or certify parts. No warranty or guarantee is made against these results.
 [2] Bounds are based on one standard deviation of each population with ten samples per orientation and machine. Test specimens were 6.35 mm diameter round bars machined from coupons (75x75x13mm). Direction XY data is an average of both X and Y horizontal build orientations.
 [3] Solutionize at 1850°F ± 25 (1010 °C) for 45 minutes. Cool to room temperature at a rate equivalent to air cooling. Temper at 1000°F (537 °C) for 4h and air cool.

Post Heat Treatment Microstructure (x 50 magnification, Vertical Build Direction)



Chemical Composition

	Weight Percent (nominal)					
	Fe	Cr	Mo	Si	V	C
MetcoAdd H13 Series	Balance	5.2	1.3	1.0	1.0	0.4

Particle Size Distribution and Hall Flow

	Nominal Range [µm]	D90 [µm]	D50 [µm]	D10 [µm]	Hall Flow [s/50 g]
MetcoAdd H13-A	-45 +15	50	34	21	≤ 25
MetcoAdd H13-B	-90 +45	-	-	-	-

For the nominal range, particle size analysis 45 µm or above measured by sieve (ASTM B214), analysis below 45 µm by laser diffraction (ASTM C 1070, Microtrac). | Fractional analysis (D90, D50, D10) are nominal values by laser diffraction. Hall flow (ASTM B213).

Product Information

Classification	Alloy, Iron Base
Chemistry	Fe 5Cr 1Mo 1Si 1V 0.4C
Manufacture	Gas atomized (Argon)
Morphology	Spheroidal
Apparent Density	> 4.0 g/cm ³ (typical)
Melting Range	1371 to 1482 °C (2500 to 2700 °F) (typical)
Process	H13-A: Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB) H13-B: Directed Energy Deposition (DED)
Safety Data Sheet	50-2134 www.oerlikon.com/metco
Package size	10 lb (approx. 4.5 kg) (stock)
Distribution	Global
Order No.	H13-A: 1100784 H13-B: 1100785

Usage Recommendations

- Blend contents prior to use to prevent segregation
- Keep in the original container, or an approved alternative, tightly closed when not in use
- Powder from previously opened containers should be stored in a humidity-controlled environment

oerlikon
am

www.oerlikon.com/am

28 Ni Nickel	27 Co Cobalt	26 Fe Iron	22 Ti Titanium
---------------------------	---------------------------	-------------------------	-----------------------------

AM Metal Powder Portfolio

Check our full portfolio at <https://www.oerlikon.com/am/en/offerings/metal-powders> or contact us at am@oerlikon.com

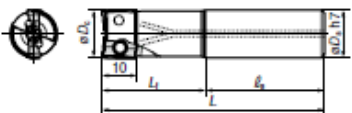
We have a broad range of existing alloys, supported by ongoing development. We also know that current off-the-shelf solutions in AM cannot answer every production need. Our R&D teams can rapidly design, optimize, and produce new and custom alloy chemistries for pilot atomization and AM validation in our production facilities.

7.3. Melléklet: Forgácsoló erő mérése során használt váltólapka és szerszámtest adatlapja

SEC-Wave Mill

WEX 2000E/EL Type

High Efficiency Machining for Steel, Stainless Steel, Cast Iron, Exotic Alloy, and Non-Ferrous Metal





Modular Type **WEX H130**

■ Body (Standard Type)

Cat. No.	Dc	Dimensions (mm)					No. of Teeth	Weight (kg)
		Dc	Dn	Lr	Ld	L		
WEX 2014E	●	14	16	25	55	80	1	0.10
2016E	●	16	16	25	75	100	2	0.13
2018E	●	18	16	25	75	100	2	0.14
2020E	●	20	20	30	80	110	3	0.22
2022E	●	22	20	30	80	110	3	0.23
WEX 2025E	●	25	25	35	85	120	4	0.38
2028E	●	28	25	35	85	120	4	0.39
2030E	●	30	25	35	85	120	4	0.40
2032E	●	32	32	40	90	130	5	0.70
2040E	●	40	32	30	120	150	6	0.91
WEX 2050E	●	50	32	30	120	150	7	1.02
2063E	●	63	32	30	120	150	8	1.22

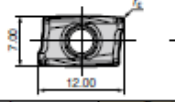
Inserts are not included.

■ Body (Long Type)

Cat. No.	Dc	Dimensions (mm)					No. of Teeth	Weight (kg)
		Dc	Dn	Lr	Ld	L		
WEX 2014EL	●	14	16	25	95	120	1	0.14
2016EL	●	16	16	25	120	145	2	0.19
2018EL	●	18	16	25	120	145	2	0.19
2020EL	●	20	20	40	110	150	2	0.32
2022EL	●	22	20	30	120	150	2	0.33
WEX 2025EL	●	25	25	50	120	170	2	0.55
2028EL	●	28	25	30	140	170	2	0.59
2030EL	●	30	25	30	140	170	2	0.60
2032EL	●	32	32	60	120	180	2	0.99
2040EL	●	40	32	30	150	180	2	1.12

Inserts are not included.

■ Inserts



Grade: Coated Carbide

Application: High Speed/Light General Purpose, Roughing

Cat. No.	Coated Carbide						Substrate	DIN
	ACP100	ACP200	ACP300	ACK200	ACK300	ACK200		
AXMT 123504PEER-G	●	●	●	●	●	●	HT	0.4
123508PEER-G	●	●	●	●	●	●	HT	0.8
123512PEER-G	●	●	●	●	●	●	HT	1.2
AXMT 123504PEER-H	●	●	●	●	●	●	HT	0.4
123508PEER-H	●	●	●	●	●	●	HT	0.8
123512PEER-H	●	●	●	●	●	●	HT	1.2
AXMT 123504PEER-E	●	●	●	●	●	●	HT	0.4
123508PEER-E	●	●	●	●	●	●	HT	0.8
123512PEER-E	●	●	●	●	●	●	HT	1.2
AXMT 123508PEER-EH	●	●	●	●	●	●	HT	0.8
AXET 123502PEFR-S	—	—	—	—	—	—	HT	0.2
123504PEFR-S	—	—	—	—	—	—	HT	0.4
123508PEFR-S	—	—	—	—	—	—	HT	0.8

■ Spare Parts

Screw	Spanner	Anti-seize Cream	Applicable Endmill
 BFTX2000IP 2.0 BFTX2000IP 2.0	 TRDR08IP	 SUMI-P	WEX2014E(EL) to WEX2018E(EL) WEX2020E(EL) to WEX2063E

Recommended Tightening Torque (N·m)

Recommended Cutting Conditions **WEX H130**

H90

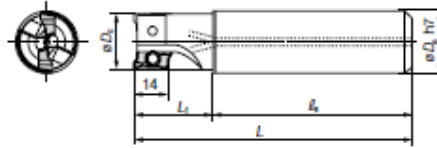
● mark : Standard stocked item (expanded item) ▲ mark : To be replaced by new item (Please confirm stock availability)

Rake Angle	Radial	8° to 15°	14mm	90°	P M K N S H
	Axial	16° to 24°			

SEC-Wave Mill

WEX 3000 E/ES/EL E-C/ES-CType

High Efficiency Machining for Steel, Stainless Steel, Cast Iron, Exotic Alloy, and Non-Ferrous Metal



Body (Standard Type)

Cat. No.	Stock	Dimensions (mm)					No. of Teeth	Weight (kg)
		ϕD_1	ϕD_2	L_1	L_2	L		
WEX 3025E-20	●	25	20	35	85	120	2	0.25
3025E	●	25	25	35	85	120	2	0.37
3028E	●	28	25	35	85	120	2	0.39
3030E	●	30	25	40	90	130	3	0.42
3032E-25	●	32	25	40	90	130	3	0.43
WEX 3032E	●	32	32	40	90	130	3	0.67
3035E	●	35	32	40	90	130	3	0.69
3040E	●	40	32	50	120	170	4	1.01
3050E	●	50	32	50	120	170	5	1.23
3063E	●	63	32	50	120	170	6	1.58

Body (Short Type)

WEX 3050ES	●	50	32	25	110	135	5	0.86
3050ES-42	●	50	42	25	110	135	5	1.36
3063ES	●	63	32	25	110	135	6	1.02
3063ES-42	●	63	42	25	110	135	6	1.52

Inserts are not included.

Body (Long Type)

Cat. No.	Stock	Dimensions (mm)					No. of Teeth	Weight (kg)
		ϕD_1	ϕD_2	L_1	L_2	L		
WEX 3025EL	●	25	25	50	120	170	2	0.54
3028EL	●	28	25	50	120	170	2	0.56
3030EL	●	30	25	60	120	180	2	0.60
3032EL	●	32	32	60	120	180	2	0.95
3035EL	●	35	32	60	120	180	2	0.98
WEX 3040EL	●	40	32	80	140	220	2	1.38

Body (Coarse Pitch Type)

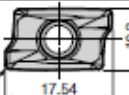
WEX 3040E-C	●	40	32	50	120	170	3	1.04
3050E-C	●	50	32	50	120	170	3	1.28
3063E-C	●	63	32	50	120	170	4	1.64

Body (Short, Coarse Pitch Type)

WEX 3050ES-C	●	50	32	25	110	135	3	0.91
3050ES-C-42	●	50	42	25	110	135	3	1.41
3063ES-C	●	63	32	25	110	135	4	1.07
3063ES-C-42	●	63	42	25	110	135	4	1.57

Inserts are not included.

Inserts (Common)

								
Grade		Coated Carbide					Carbide	DLC
Application	High Speed/Light	P		K		N		N
	General Purpose			K		N		N
	Roughing			K		N		
Cat. No.		ACP100	ACP200	ACP300	ACX200	ACX300	ACX400	CL 1000
AXMT 170508PEER-L		●	●	●	●	●	●	—
AXMT 170504PEER-G		●	●	●	●	●	●	—
170508PEER-G		●	●	●	●	●	●	—
170512PEER-G		●	●	●	●	●	●	—
170516PEER-G		●	●	●	●	●	●	—
170520PEER-G *		●	●	●	●	●	●	—
170530PEER-G *		●	●	●	●	●	●	—
AXMT 170508PEER-H		●	●	●	●	●	●	—
170512PEER-H		●	●	●	●	●	●	—
AXMT 170504PEER-E		●	●	●	●	●	●	—
170508PEER-E		●	●	●	●	●	●	—
170512PEER-E		●	●	●	●	●	●	—
170516PEER-E		●	●	●	●	●	●	—
170520PEER-E *		●	●	●	●	●	●	—
170530PEER-E *		●	●	●	●	●	●	—
AXMT 170508PEER-EH		●	●	●	●	●	●	—
AXET 170502PEFR-S		—	—	—	—	—	—	●
170504PEFR-S		—	—	—	—	—	—	●
170508PEFR-S		—	—	—	—	—	—	●

* Cutter body modification is required.

Spare Parts

Screw	Spanner	Anti-seize Cream
BFTX0409IP	TRDR15IP	SUMI-P

Recommended Tightening Torque (N·m)

*Cutter body modification is required when attaching an R3.0 insert with a 2.0 nose radii.

Rework this edge.
Reworking guidelines
For 2.0 nose radii: C1
(AXMT 170520PEER)
For 3.0 nose radii: C1.5
(AXMT 170530PEER)
Standard: C0.5.

Recommended Cutting Conditions

● mark : Standard stocked item (expanded item) ▲ mark : To be replaced by new item (Please confirm stock availability)

H
Milling
Cutters
Face Milling
Radius
Multi-Purpose
Shoulder Milling
R/Cutting
Groove/T-Slot
Chamfering
Aluminum/Light Alloy
High-Speed Cast Iron

H91

7.4. Melléklet: Kívánt méretpontosság megállapításához használt additív technológiai paraméterek AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél esetében.

17. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a hegesztőfej sebességét változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	5	1,04	300	1	50%	0,5	43,3
2.	65%	292,5	5	1,04	300	1	50%	0,5	56,3
3.	80%	360	5	1,04	300	1	50%	0,5	69,2
4.	50%	225	10	1,04	300	1	50%	0,5	21,6
5.	65%	292,5	10	1,04	300	1	50%	0,5	28,1
6.	80%	360	10	1,04	300	1	50%	0,5	34,6
7.	50%	225	15	1,04	300	1	50%	0,5	14,4
8.	65%	292,5	15	1,04	300	1	50%	0,5	18,8
9.	80%	360	15	1,04	300	1	50%	0,5	23,1

18. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a lézersugár átmérőjének változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	5	0,74	200	1	50%	0,5	60,8
2.	65%	292,5	5	0,74	200	1	50%	0,5	79,1
3.	80%	360	5	0,74	200	1	50%	0,5	97,3
4.	50%	225	5	1,25	200	1	50%	0,5	36,0
5.	65%	292,5	5	1,25	200	1	50%	0,5	46,8
6.	80%	360	5	1,25	200	1	50%	0,5	57,6
7.	50%	225	5	1,5	200	1	50%	0,5	30,0
8.	65%	292,5	5	1,5	200	1	50%	0,5	39,0
9.	80%	360	5	1,5	200	1	50%	0,5	48,0

19. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a rétegvastagság változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	10	1,04	100	1	50%	0,5	21,6
2.	65%	292,5	10	1,04	100	1	50%	0,5	28,1
3.	80%	360	10	1,04	100	1	50%	0,5	34,6
4.	50%	225	10	1,04	200	1	50%	0,5	21,6
5.	65%	292,5	10	1,04	200	1	50%	0,5	28,1
6.	80%	360	10	1,04	200	1	50%	0,5	34,6
7.	50%	225	10	1,04	400	1	50%	0,5	21,6
8.	65%	292,5	10	1,04	400	1	50%	0,5	28,1
9.	80%	360	10	1,04	400	1	50%	0,5	34,6

20. Táblázat: : A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a vonalköz változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm ³)
1.	60%	270	5	0,74	200	0,74	40%	0,296	73,0
2.	75%	337,5	5	0,74	200	0,74	40%	0,296	91,2
3.	90%	405	5	0,74	200	0,74	40%	0,296	109,5
4.	60%	270	5	0,74	200	0,74	50%	0,37	73,0
5.	75%	337,5	5	0,74	200	0,74	50%	0,37	91,2
6.	90%	405	5	0,74	200	0,74	50%	0,37	109,5
7.	60%	270	5	0,74	200	0,74	60%	0,444	73,0
8.	75%	337,5	5	0,74	200	0,74	60%	0,444	91,2
9.	90%	405	5	0,74	200	0,74	60%	0,444	109,5

7.5. Melléklet: Szövetszerkezet vizsgálatához lézersugaras bevonatolással gyártott AISI H13-as mintadarabok additív technológiai paraméterei.

21. Táblázat: : Szövetszerkezet analízis céljából készített mintadarabok additív gyártás technológiai paraméterei lézersugár teljesítményét és a hegesztőfej sebességét változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm^3)
0.	80%	360	10	1,04	300	1	50%	0,5	34,6
1.	60%	270	5	1,04	300	1	50%	0,5	51,9
2.	75%	337,5	5	1,04	300	1	50%	0,5	64,9
3.	90%	405	5	1,04	300	1	50%	0,5	77,9
4.	60%	270	10	1,04	300	1	50%	0,5	26,0
5.	75%	337,5	10	1,04	300	1	50%	0,5	32,5
6.	90%	405	10	1,04	300	1	50%	0,5	38,9
7.	60%	270	15	1,04	300	1	50%	0,5	17,3
8.	75%	337,5	15	1,04	300	1	50%	0,5	21,6
9.	90%	405	15	1,04	300	1	50%	0,5	26,0

22. Táblázat: : Szövetszerkezet analízis céljából készített mintadarabok additív gyártás technológiai paraméterei lézersugár teljesítményét és a lézersugár átmérőjének változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μ m)	Vonal vastagság (mm)	Átefdés (%)	Vonalköz (mm)	Ener- giasűrűség (J/mm ³)
1.	60%	270	5	0,74	200	1	50%	0,5	73,0
2.	75%	337,5	5	0,74	200	1	50%	0,5	91,2
3.	90%	405	5	0,74	200	1	50%	0,5	109,5
4.	60%	270	5	1,24	200	1	50%	0,5	43,5
5.	75%	337,5	5	1,24	200	1	50%	0,5	54,4
6.	90%	405	5	1,24	200	1	50%	0,5	65,3
7.	60%	270	5	1,5	200	1	50%	0,5	36,0
8.	75%	337,5	5	1,5	200	1	50%	0,5	45,0
9.	90%	405	5	1,5	200	1	50%	0,5	54,0

23. Táblázat: : Szövetszerkezet analízis céljából készített mintadarabok additív gyártás technológiai paraméterei lézersugár teljesítményét és a rétegvastagság változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefdés (%)	Vonalköz (mm)	Energiasűrűség (J/mm ³)
0.	80%	360	10	1,04	300	1	50%	0,5	34,6
1.	60%	270	10	1,04	100	1	50%	0,5	26,0
2.	75%	337,5	10	1,04	100	1	50%	0,5	32,5
3.	90%	405	10	1,04	100	1	50%	0,5	38,9
4.	60%	270	10	1,04	200	1	50%	0,5	26,0
5.	75%	337,5	10	1,04	200	1	50%	0,5	32,5
6.	90%	405	10	1,04	200	1	50%	0,5	38,9
7.	60%	270	10	1,04	400	1	50%	0,5	26,0
8.	75%	337,5	10	1,04	400	1	50%	0,5	32,5
9.	90%	405	10	1,04	400	1	50%	0,5	38,9

24. Táblázat: Az első próba gyártások alapján módosított paraméterek AISI H13-as melegalakító szerszámacél esetében

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézer-sugár átmérő (mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefdés (%)	Vonalköz (mm)
10.	77,5%	348,75	5	0,74	200	0,74	40%	0,296
11.	62,5%	281,25	5	0,74	200	0,74	50%	0,37
12.	65,0%	292,5	5	0,74	200	0,74	50%	0,37
13.	67,5%	303,75	5	0,74	200	0,74	50%	0,37

7.6. Melléklet: Kívánt méretpontosság megállapításához használt additív technológiai paraméterek 15-5PH korrózióálló acél esetében.

25. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a hegesztő-fej sebességét változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefedés (%)	Vonalköz (mm)	Energiasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	5	1,04	300	1	50%	0,5	43,27
2.	65%	292,5	5	1,04	300	1	50%	0,5	56,25
3.	80%	360	5	1,04	300	1	50%	0,5	69,23
4.	50%	225	10	1,04	300	1	50%	0,5	21,63
5.	65%	292,5	10	1,04	300	1	50%	0,5	28,13
6.	80%	360	10	1,04	300	1	50%	0,5	34,62
7.	50%	225	15	1,04	300	1	50%	0,5	14,42
8.	65%	292,5	15	1,04	300	1	50%	0,5	18,75
9.	80%	360	15	1,04	300	1	50%	0,5	23,08

26. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a lézersugár átmérőjének változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefdés (%)	Vonalköz (mm)	Energiasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	5	0,74	200	1	50%	0,5	60,81
2.	65%	292,5	5	0,74	200	1	50%	0,5	79,05
3.	80%	360	5	0,74	200	1	50%	0,5	97,30
4.	50%	225	5	1,25	200	1	50%	0,5	36,00
5.	65%	292,5	5	1,25	200	1	50%	0,5	46,80
6.	80%	360	5	1,25	200	1	50%	0,5	57,60
7.	50%	225	5	1,5	200	1	50%	0,5	30,00
8.	65%	292,5	5	1,5	200	1	50%	0,5	39,00
9.	80%	360	5	1,5	200	1	50%	0,5	48

27. Táblázat: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a rétegvastagság változtatásával

Sorszám	Teljesítmény P(%)	Teljesítmény P(W)	Sebesség v(mm/s)	Lézersugár átmérő d(mm)	Rétegvastagság (μm)	Vonal vastagság (mm)	Átefdés (%)	Vonalköz (mm)	Energiasűrűség (J/mm ³)
1.	50%	225	10	1,04	100	1	50%	0,5	21,6
2.	65%	292,5	10	1,04	100	1	50%	0,5	28,1
3.	80%	360	10	1,04	100	1	50%	0,5	34,6
4.	50%	225	10	1,04	200	1	50%	0,5	21,6
5.	65%	292,5	10	1,04	200	1	50%	0,5	28,1
6.	80%	360	10	1,04	200	1	50%	0,5	34,6
7.	50%	225	10	1,04	400	1	50%	0,5	21,6
8.	65%	292,5	10	1,04	400	1	50%	0,5	28,1
9.	80%	360	10	1,04	400	1	50%	0,5	34,6

7.7. Melléklet: Additív technológiai próbagyártások során elért próbatest magasságok

28. Táblázat: Lézersugár teljesítményének és pásztázási sebesség változtatásával elért próbatest magasságok AISI H13-as melegalakító szerszámacél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	2	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	1,9	5	Nem megfelelő, alacsony
3.	3,2	5	Nem megfelelő, alacsony
4.	0,5	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	0,6	5	Nem megfelelő, alacsony
6.	1,3	5	Nem megfelelő, alacsony
7.	-	5	A paraméterek által mutatott tendencia alapján a gyártás értelmetlen.
8.	-	5	
9.	-	5	

29. Táblázat: Lézersugár teljesítményének és átmérőjének változtatásával elért próbatest magasságok AISI H13-as melegalakító szerszámacél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	1,8	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	3,6	5	Nem megfelelő, alacsony
3.	4,6	5	Nem megfelelő, alacsony
4.	0,6	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	1	5	Nem megfelelő, alacsony
6.	1,8	5	Nem megfelelő, alacsony
7.	-	5	A paraméterek által mutatott tendencia alapján a gyártás értelmetlen.
8.	-	5	
9.	-	5	

30. Táblázat: Lézersugár teljesítményének és a rétegvastagság változtatásával elért próbatest magasságok AISI H13-as melegalakító szerszámacél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	1	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	2,5	5	Nem megfelelő, alacsony
3.	1,5	5	Nem megfelelő, alacsony
4.	0,8	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	1,2	5	Nem megfelelő, alacsony
6.	1,7	5	Nem megfelelő, alacsony
7.	-	5	A paraméterek által mutatott tendencia alapján a gyártás értelmetlen.
8.	-	5	
9.	-	5	

31. Táblázat: Lézersugár teljesítményének és az egyes rétegeket alkotó vonalak közti távolság (Hatch Distance) változtatásával elért próbatest magasságok AISI H13-as melegalakító szerszámacél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	2	3	Nem megfelelő, alacsony
2.	3,3	3	Megfelelő
3.	3,1	1,6	Nem megfelelő, túl magas
4.	2,7	3	Nem megfelelő, alacsony
5.	4	3	Nem megfelelő, túl magas
6.	2,7	1,6	Nem megfelelő, túl magas
7.	3,1	3	Megfelelő
8.	4,6	3	Nem megfelelő, túl magas
9.	3,7	1,6	Nem megfelelő, túl magas

32. Táblázat: Lézersugár teljesítményének és pásztázási sebesség változtatásával elért próbatest magasságok 15-5PH korrózió álló acél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	2,1	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	3,6	5	Nem megfelelő, alacsony
3.	5,6	5	Nem megfelelő, alacsony
4.	1	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	1,5	5	Nem megfelelő, alacsony
6.	2,2	5	Nem megfelelő, alacsony
7.	0,5	5	A paraméterek által mutatott tendencia alapján a gyártás értelmetlen.
8.	-	5	
9.	-	5	

33. Táblázat: : Lézersugár teljesítményének és átmérőjének változtatásával elért próbatest magasságok 15-5PH korrózió álló acél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	3,7	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	6	5	Nem megfelelő, túl magas
3.	4,7	5	Nem megfelelő, alacsony - jól közelít
4.	3	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	5,5	5	Nem megfelelő, magas - jól közelít
6.	6	5	Nem megfelelő, magas
7.	3	5	Nem megfelelő, alacsony
8.	7,1	5	Nem megfelelő, magas
9.	6,65	5	Nem megfelelő, magas

34. Táblázat Táblázat 35: Lézersugár teljesítményének és a rétegvastagság változtatásával elért próbatest magasságok 15-5PH korrózió álló acél alkalmazása esetén

Sorszám	Elért magasság (mm)	Cél magasság (mm)	Megjegyzés
1.	2	5	Nem megfelelő, alacsony
2.	6	5	Nem megfelelő, magas
3.	6,5	5	Nem megfelelő, magas
4.	1	5	Nem megfelelő, alacsony
5.	2	5	Nem megfelelő, alacsony
6.	3	5	Nem megfelelő, alacsony
7.	-	5	Túl nagy réteg magasság; értelmetlen a gyártás
8.	-	5	
9.	-	5	

7.8. Melléklet: Forgácsolóerő méréséhez gyártott próbatestek geometriai méretei

36. Táblázat: "1"-es számú alaplagra gyártott próbatestek geometriai méretei

Próbatest kód	Magasság (mm)			Szélesség (mm)	Hosszúság (mm)
	Legkisebb mért magasság	Legnagyobb mért magasság	Mértékértékek közti különbség		
Névleges méret	5		-	11	13
1/1	7,30	10,10	2,80	14,30	15,80
1/2	6,55	7,00	0,45	12,00	14,50
1/3	5,6	6,80	1,20	12,40	14,10

37. Táblázat: "2"-es számú alaplagra gyártott próbatestek geometriai méretei

Próbatest kód	Magasság (mm)			Szélesség (mm)	Hosszúság (mm)
	Legkisebb mért magasság	Legnagyobb mért magasság	Mértékértékek közti különbség		
Névleges méret	5		-	11	15
2/1	3,70	4,85	1,15	11,70	15,70
2/2	4,05	5,00	0,95	12,00	15,80
2/3	3,6	4,30	0,70	11,70	15,80

38. Táblázat: "3"-as számú alaplagra gyártott próbatestek geometriai méretei

Próbatest kód	Magasság (mm)			Szélesség (mm)	Hosszúság (mm)
	Legkisebb mért magasság	Legnagyobb mért magasság	Mértékértékek közti különbség		
Névleges	5		-	11	18
3/1	3,95	5,50	1,55	11,80	19,00
3/2	4,10	5,40	1,30	11,70	18,90
3/3	5,8	6,40	0,60	12,00	19,10

7.9. Melléklet: Forgácsolt felület felületi érdesség mérésének eredményei

39. Táblázat: 1. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért átlagos és közepes érdesség mélységek, a mért adatok átlagával és szórásával

Próba- test jele	Forgácsolt felület azonosí- tója	Marás tí- pusa	Mérés Sor- száma	Átlagos érdes- ség Ra (μm)	Közepes érdes- ség mélység Rz (μm)	Mért értékek átlaga		Mért értékek szórása	
						Átlagos érdes- ség Ra (μm)	Közepes érdes- ség mélység Rz (μm)	Átlagos ér- desség Ra (μm)	Közepes érdes- ség mélység Rz (μm)
1/1	1-1-1	Ellenirá- nyú marás	1.	0,413	2,760	0,434	2,780	0,126	0,670
			2.	0,569	3,460				
			3.	0,320	2,120				
	1-1-2	Egyenirá- nyú marás	1.	0,459	3,010	0,383	2,417	0,081	0,616
			2.	0,298	1,780				
			3.	0,392	2,460				
1/2	1-2-1	Ellenirá- nyú marás	1.	0,387	2,374	0,357	2,561	0,027	0,193
			2.	0,348	2,550				
			3.	0,336	2,760				
	1-2-2	Egyenirá- nyú marás	1.	0,438	4,210	0,322	2,673	0,103	1,335
			2.	0,240	1,800				
			3.	0,288	2,010				
1/3	1-3-1	Ellenirá- nyú marás	1.	0,434	3,710	0,387	2,850	0,041	0,745
			2.	0,361	2,390				
			3.	0,366	2,450				
	1-3-2	Egyenirá- nyú marás	1.	0,333	2,380	0,223	1,800	0,096	0,585
			2.	0,183	1,810				
			3.	0,153	1,210				

40. Táblázat: 2. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért átlagos és közepes érdesség mélységek, a mért adatok átlagával és szórásával

Próbatest jele	Forgácsolt felület azonosítója	Marás típusa	Mérés Sorszama	Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)	Mért értékek átlaga		Mért értékek szórása	
						Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)	Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)
2/1	2-1-1	Ellenirányú marás	1.	1,571	8,79	1,066	7,203	0,450	1,585
			2.	0,918	7,2				
			3.	0,708	5,62				
	2-1-2	Egyenirányú marás	1.	1,138	6,57	0,746	5,443	0,354	0,986
			2.	0,649	5,02				
			3.	0,451	4,74				
2/2	2-2-1	Ellenirányú marás	1.	0,782	4,1	0,687	3,757	0,083	0,302
			2.	0,655	3,64				
			3.	0,625	3,53				
	2-2-2	Egyenirányú marás	1.	0,29	2,21	0,267	2,273	0,034	0,251
			2.	0,228	2,06				
			3.	0,284	2,55				
2/3	2-3-1	Ellenirányú marás	1.	0,331	2,47	0,322	2,203	0,008	0,371
			2.	0,316	1,78				
			3.	0,318	2,36				
	2-3-2	Egyenirányú marás	1.	0,441	3,6	0,361	2,930	0,069	0,665
			2.	0,323	2,27				
			3.	0,319	2,92				

41. Táblázat: 3. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért átlagos és közepes érdesség mélységek, a mért adatok átlagával és szórásával

Próbatest jele	Forgácsolt felület azonosítója	Marás típusa	Mérés Sorszáma	Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)	Mért értékek átlaga		Mért értékek szórása	
						Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)	Átlagos érdesség Ra (μm)	Közepes érdesség mélység Rz (μm)
3/1	3-1-1	Ellenirányú marás	1.	0,273	1,81	0,255	1,593	0,022	0,196
			2.	0,231	1,43				
			3.	0,261	1,54				
	3-1-2	Egyenirányú marás	1.	0,252	1,93	0,323	2,210	0,084	0,538
			2.	0,301	1,87				
			3.	0,416	2,83				
3/2	3-2-1	Ellenirányú marás	1.	0,281	2,54	0,296	2,300	0,013	0,210
			2.	0,301	2,15				
			3.	0,305	2,21				
	3-2-2	Egyenirányú marás	1.	0,425	2,98	0,406	2,867	0,031	0,196
			2.	0,37	2,64				
			3.	0,424	2,98				
3/3	3-3-1	Ellenirányú marás	1.	0,311	2,36	0,405	2,843	0,164	0,837
			2.	0,31	2,36				
			3.	0,595	3,81				
	3-3-2	Egyenirányú marás	1.	0,219	2,05	0,288	2,247	0,065	0,182
			2.	0,347	2,41				
			3.	0,299	2,28				

7.10. Mellékélet: Keménység mérés eredményei

42. Táblázat: 1. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért keménységek, azok átlaga és szórása

Próba test kód	1/1		1/2		1/3	
Marás típusa	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás
Mérés sor-száma	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})
1.	765,6	701,7	806,8	797,4	692,2	652,4
2.	763,4	717,4	790,4	752,6	851,4	692,2
3.	949,5	756,9	809,2	964,8	759,1	632,1
4.	875,1	682,8	914	894,3	883,2	585,3
5.	795	763,4	940,4	846,3	776,7	637,1
6.	785,8	673,6	958,6	772,3	851,4	697,9
7.	690,3	681,1	779	806,8	688,4	690,3
8.	779	707,5	886	859,2	911,2	657,6
9.	838,7	654,1	843,7	765,6	854	719,4
10.	774,5	609,6	883,2	799,7	735,7	679,1
Átlag	801,7	694,8	861,1	825,9	800,3	664,3
Szórás	67,3	43,6	61,1	62,6	76,1	37,5

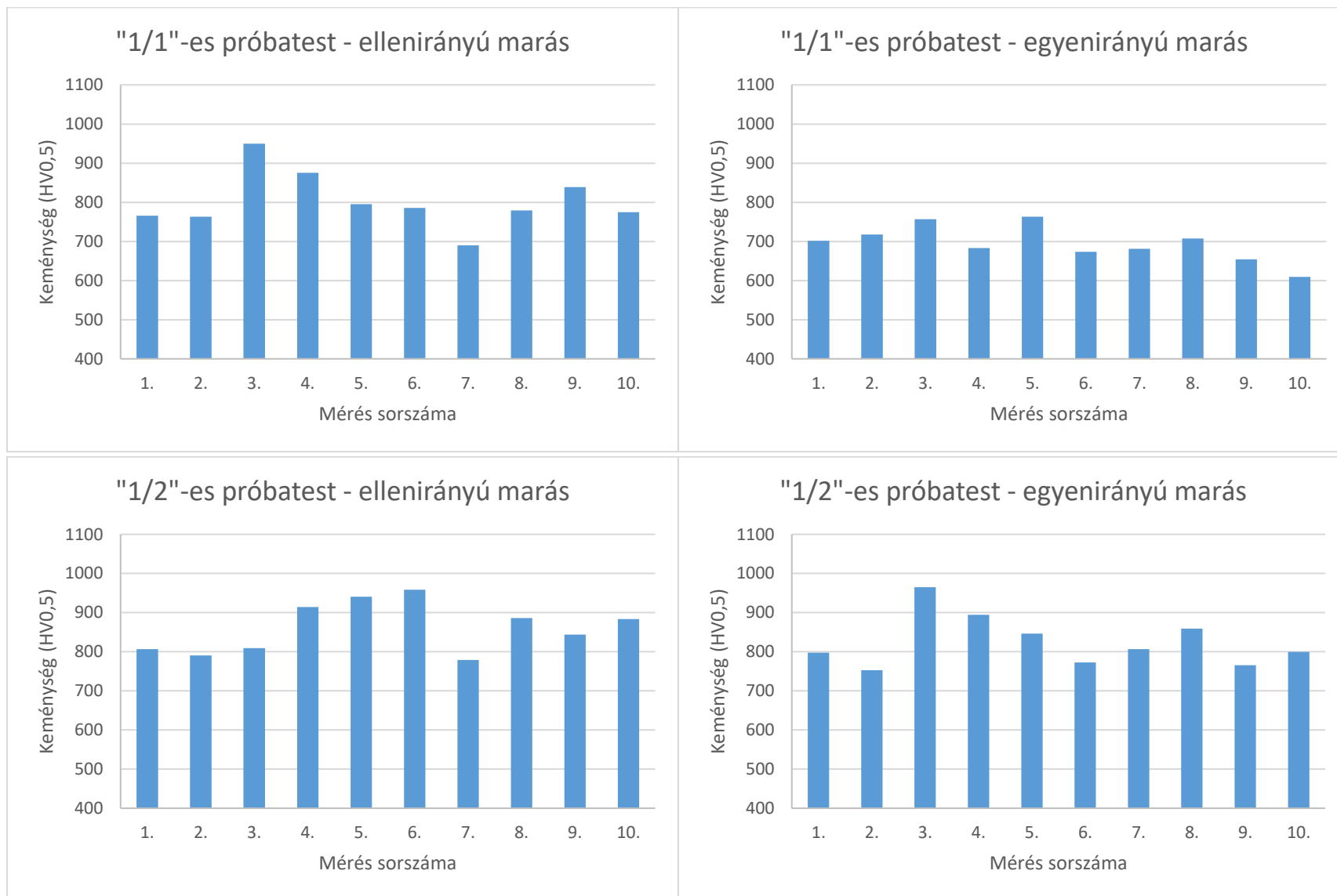
43. Táblázat: 2. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért keménységek, azok átlaga és szórása

Próba test kód	2/1		2/2		2/3	
Marás típusa	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás
Mérés sor-száma	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})
1.	600,3	643,8	614,3	614,3	595,8	559,7
2.	547,6	649,9	601,9	591,3	630,4	493,4
3.	533,2	576,6	638,7	537,1	673,6	542,3
4.	628,8	647,2	637,1	579,5	654,1	604,9
5.	570,9	534,5	601,9	538,4	721,4	563,9
6.	612,7	640,4	609,6	589,8	662,9	483,3
7.	591,3	572,3	617,5	559,7	788,1	547,6
8.	677,3	614,3	670	591,3	776,7	625,5
9.	622,3	661,1	688,4	575,2	619,1	598,8
10.	594,3	612,7	664,6	555,6	579,5	483,3
Átlag	597,9	615,3	634,4	573,2	670,2	550,3
Szórás	39,5	39,5	29,2	23,8	67,9	48,5

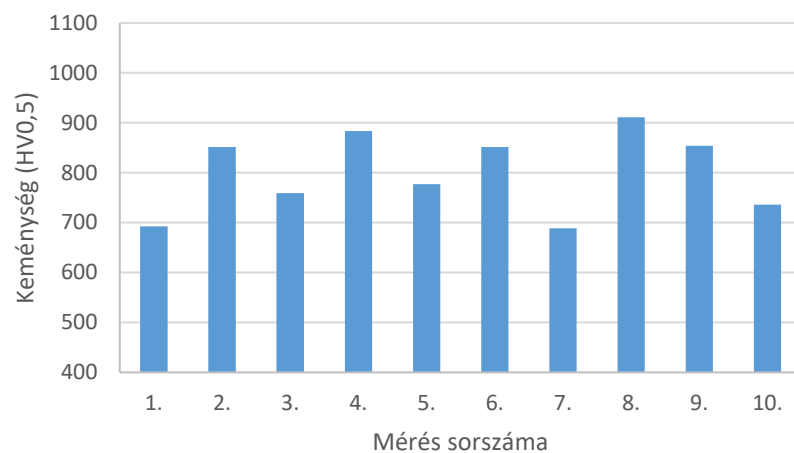
44. Táblázat: 3. alaptesten található próbatestek forgácsolt felületein mért keménységek, azok átlaga és szórása

Próba test kód	3/1		3/2		3/3	
Marás típusa	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás	Ellenirányú marás	Egyenirányú marás
Mérés sor-száma	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})	Keménység (HV _{0,5})
1.	967,9	821,3	790,4	877,8	744,1	671,8
2.	987	790,4	804,4	908,3	701,7	620,7
3.	1013,3	797,7	759,1	809,2	552,9	623,9
4.	977,4	733,7	843,7	838,7	623,9	657,6
5.	987	759,1	841,2	752,6	476,8	666,4
6.	952,5	699,8	767,8	765,6	742	661,1
7.	993,5	888,7	754,7	867,1	688,4	713,4
8.	897	916,9	788,1	762,7	625,5	714,4
9.	996,7	996,7	779	697,9	833,6	666,4
10.	928,5	949,5	828,7	781,3	794,4	681
Átlag	970,1	835,4	795,7	806,1	678,3	667,7
Szórás	33,4	93,1	31,1	62,5	104,3	29,6

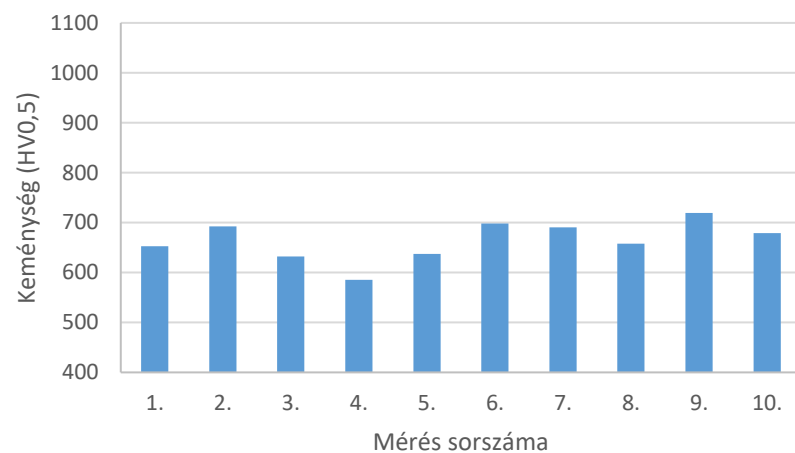
7.11. Melléklet: Keménységmérés eredményei grafikusán ábrázolva



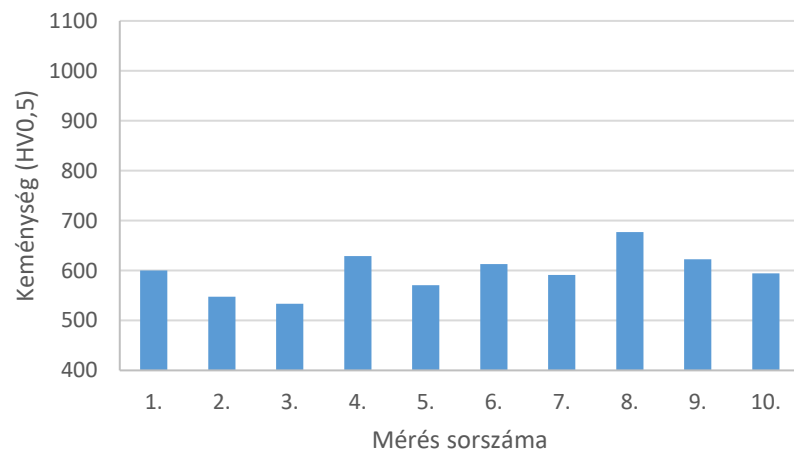
"1/3"-as próbatest - ellenirányú marás



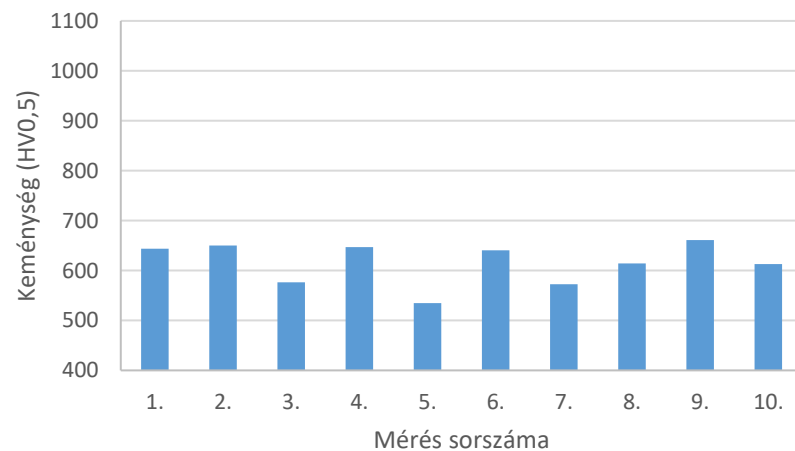
"1/3"-es próbatest - egyenirányú marás



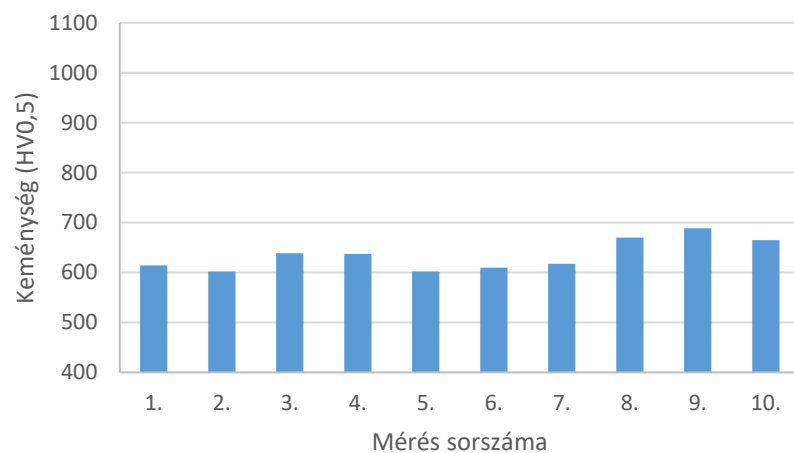
"2/1"-es próbatest - ellenirányú marás



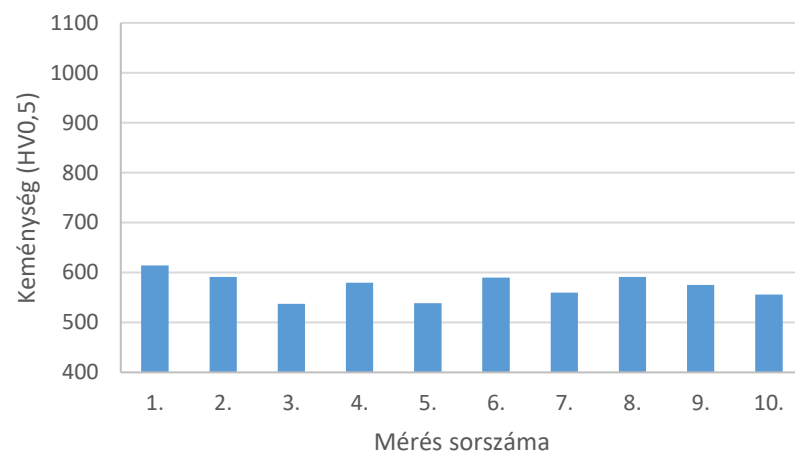
"2/1"-es próbatest - egyenirányú marás



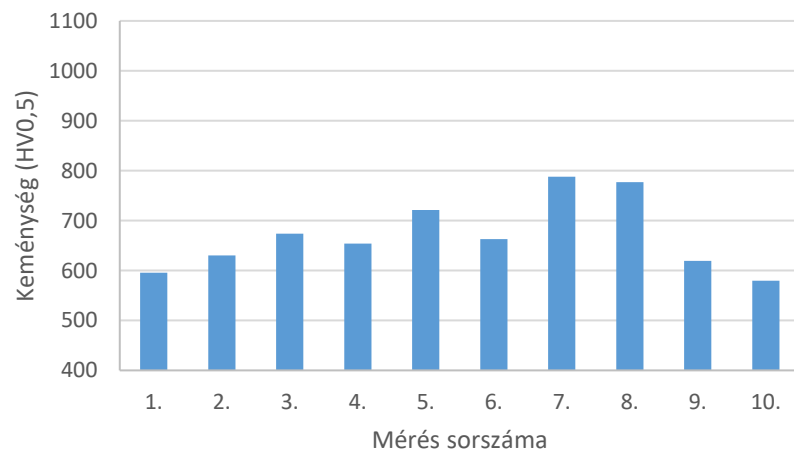
"2/2"-es próbatest - ellenirányú marás



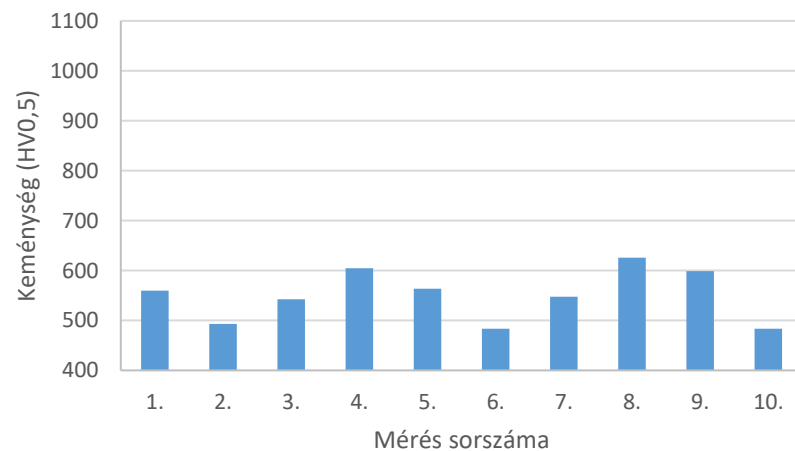
"2/2"-es próbatest - egyenirányú marás



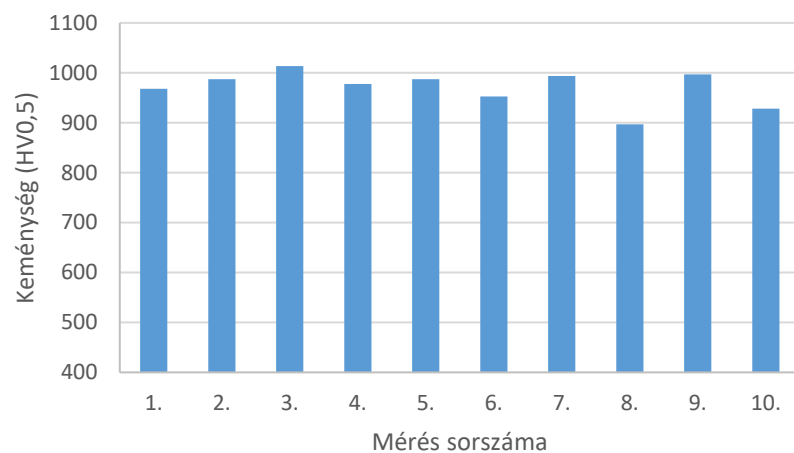
"2/3"-as próbatest - ellenirányú marás



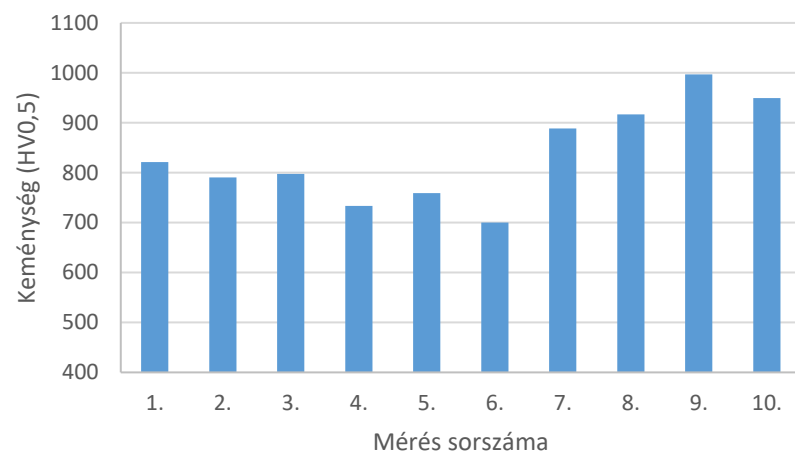
"2/3"-es próbatest - egyenirányú marás



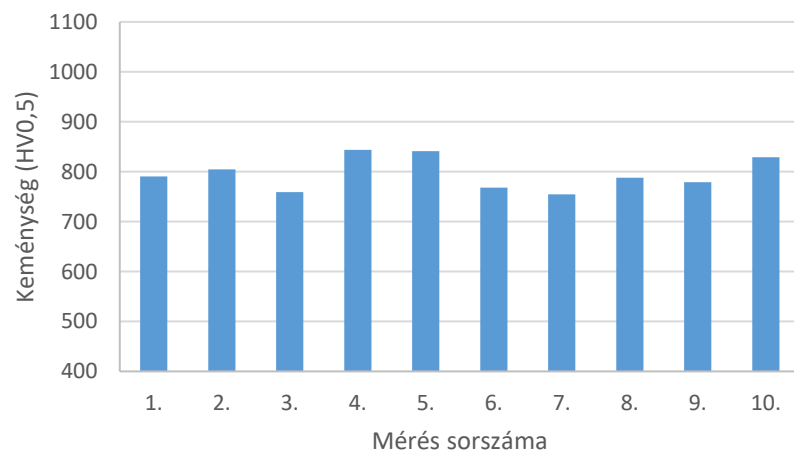
"3/1"-es próbatest - ellenirányú marás



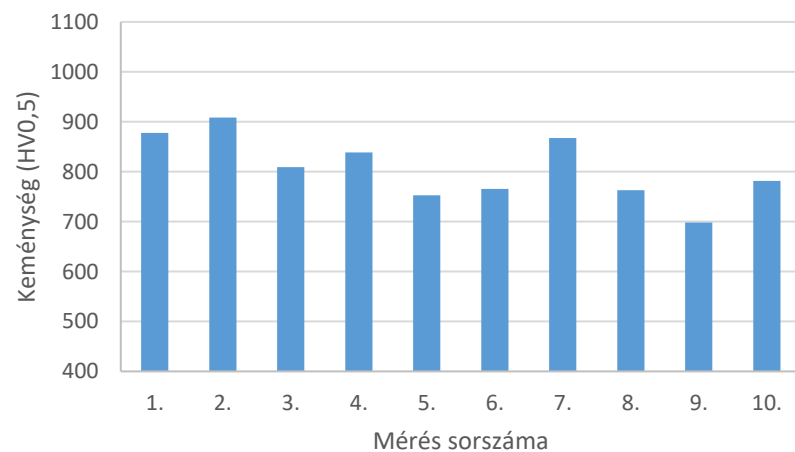
"3/1"-es próbatest - egyenirányú marás



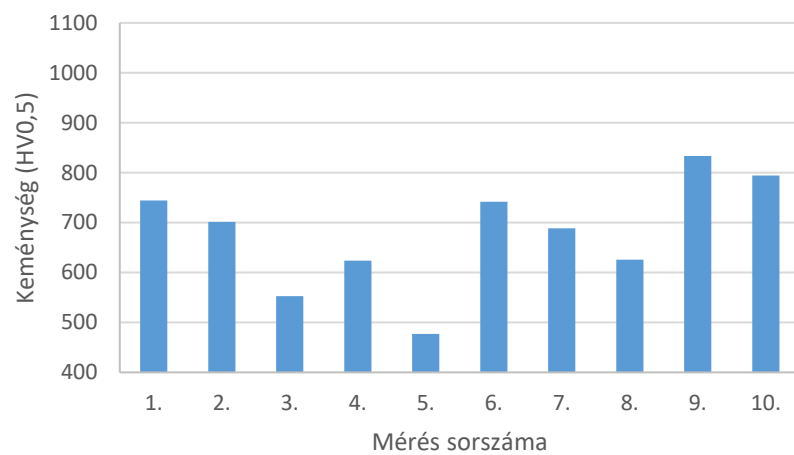
"3/2"-es próbatest - ellenirányú marás



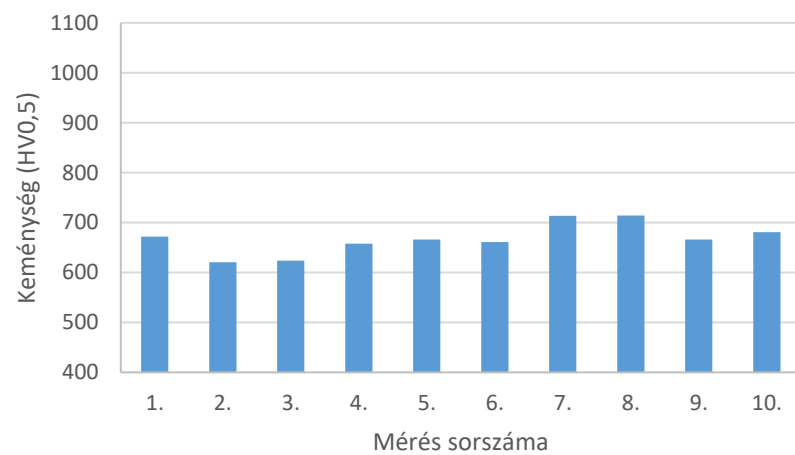
"3/2"-es próbatest - egyenirányú marás



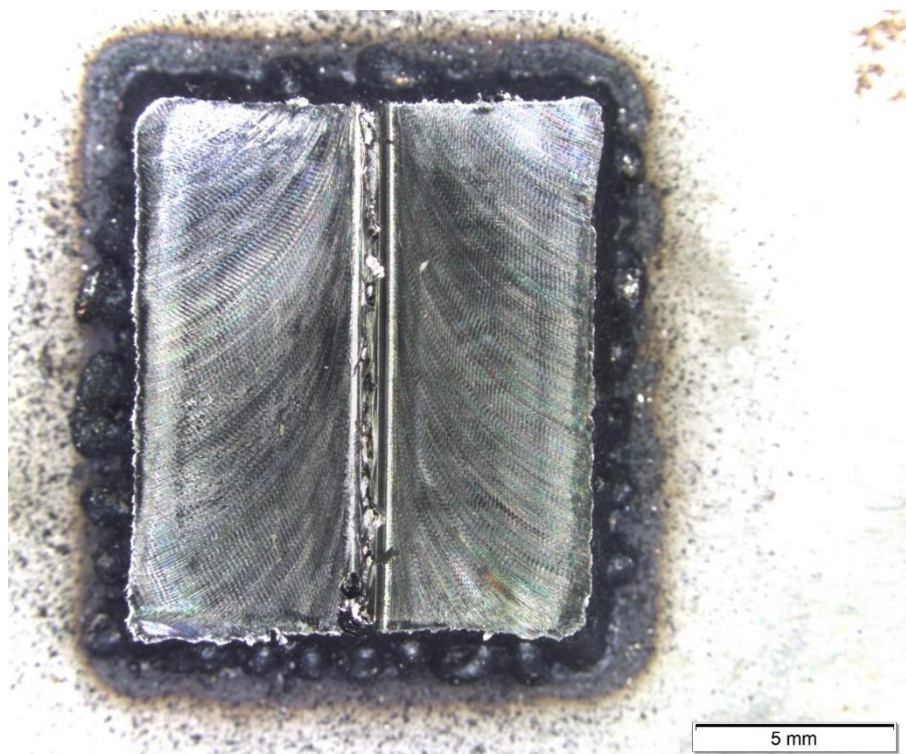
"3/3"-as próbatest - ellenirányú marás



"3/3"-es próbatest - egyenirányú marás



7.12. Melléklet: Forgácsolt felületekről készített mikroszkópos felvételek



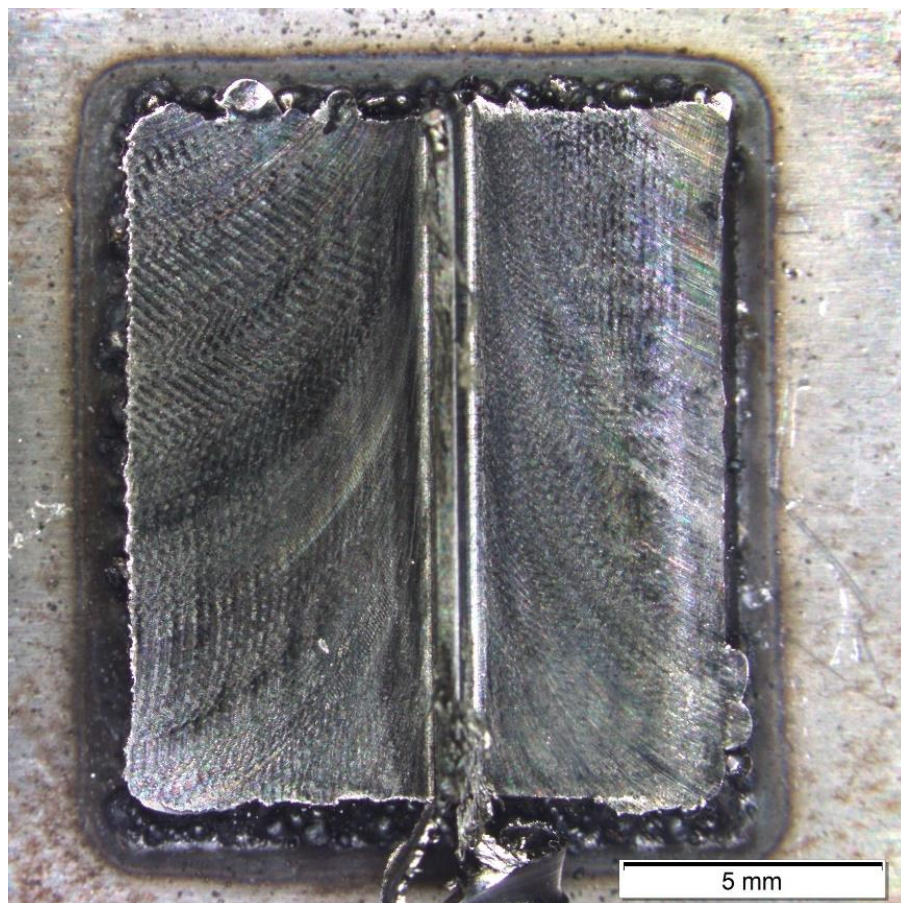
92. Ábra "1/1" - es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



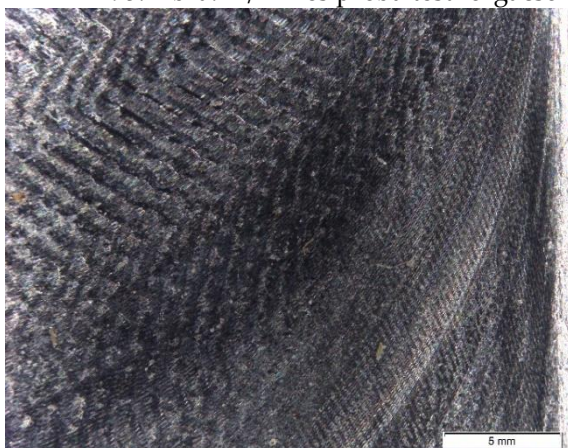
93. Ábra "1/1"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép



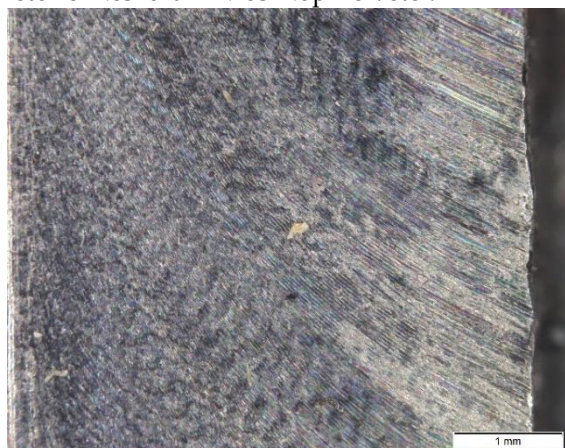
94. Ábra: "1/1"-es próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép



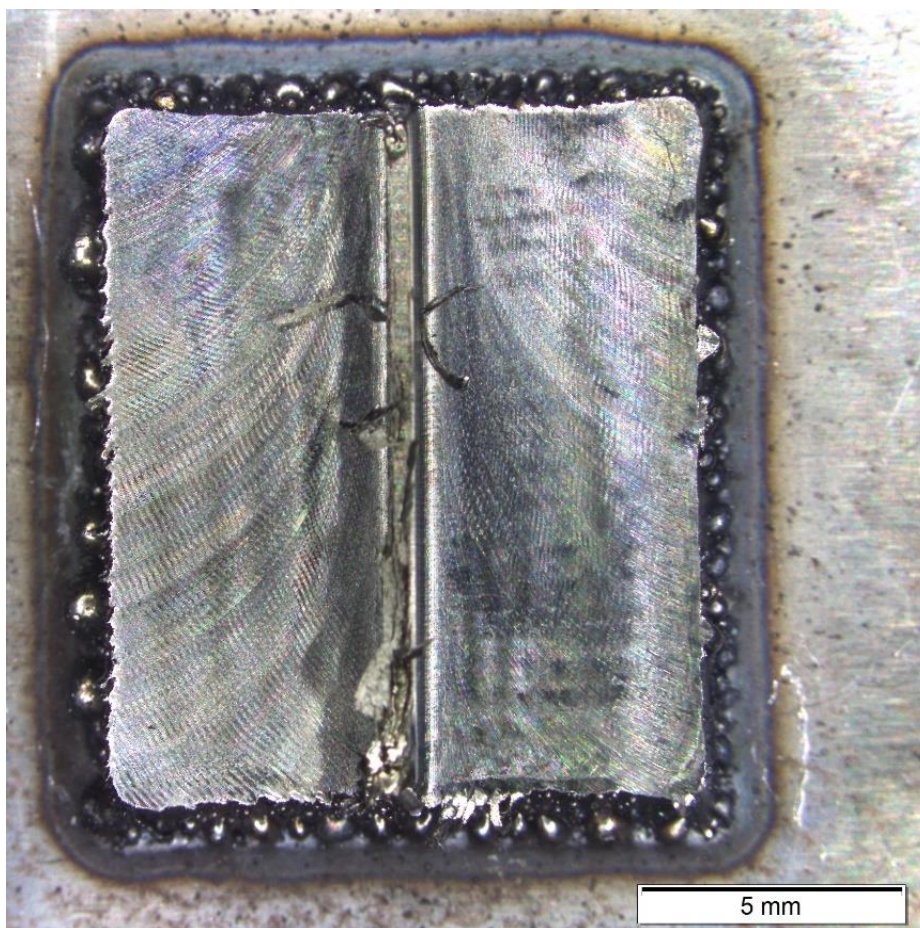
95. Ábra: "1/2" - es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



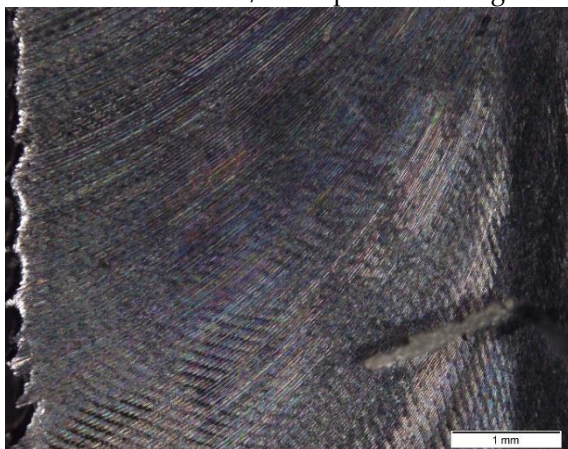
96. Ábra "1/2"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



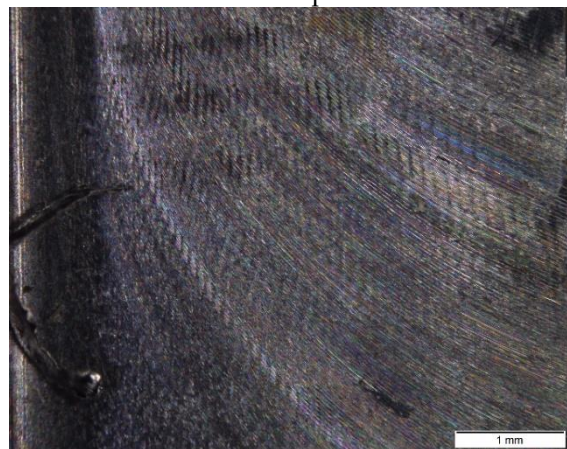
97. Ábra: "1/2"-es próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



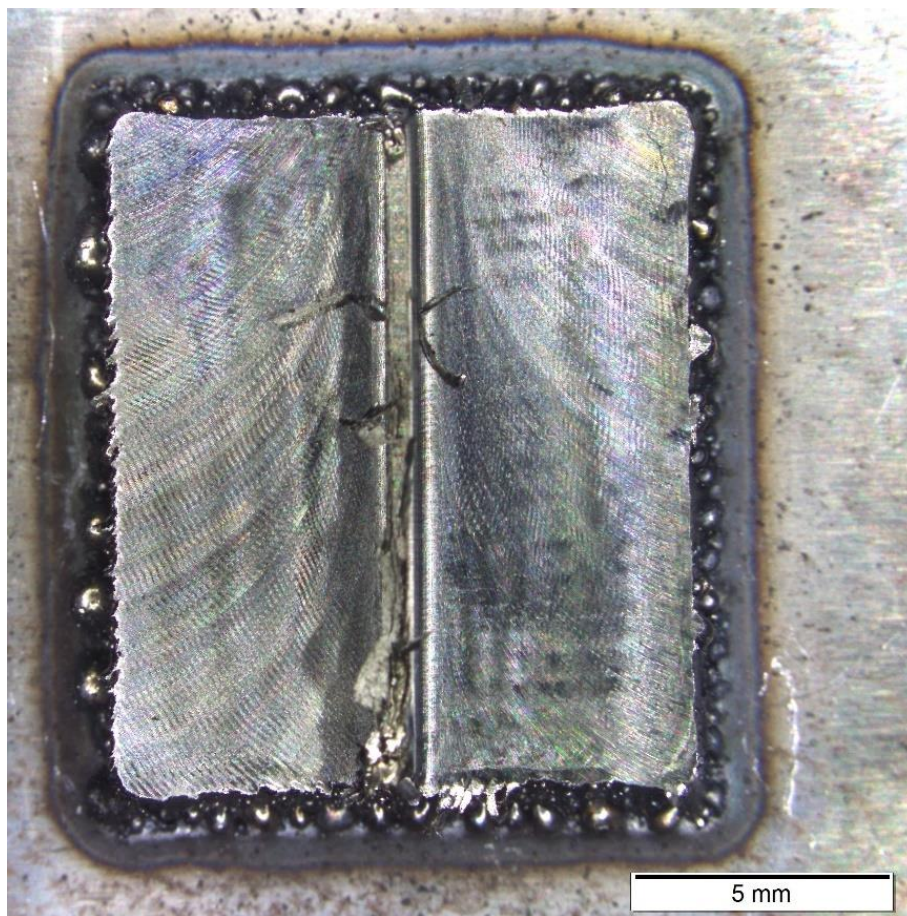
98. Ábra: "1/3"-as próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



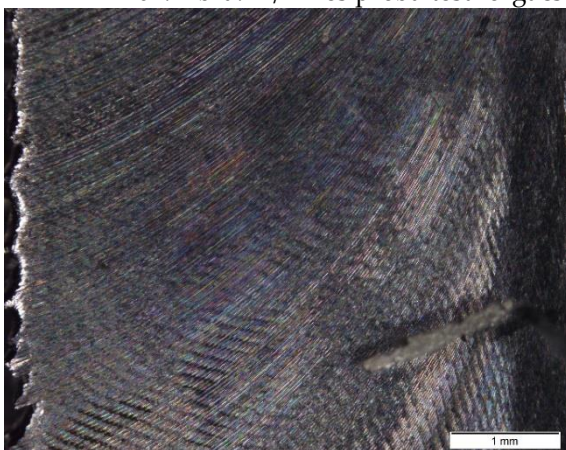
99. Ábra: "1/3"-as próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



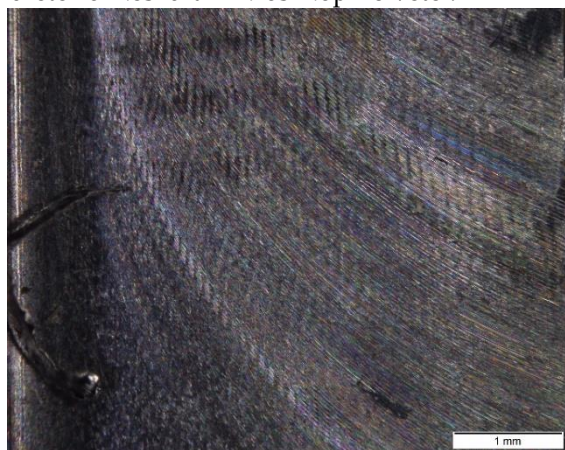
100. Ábra: "1/3"-as próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



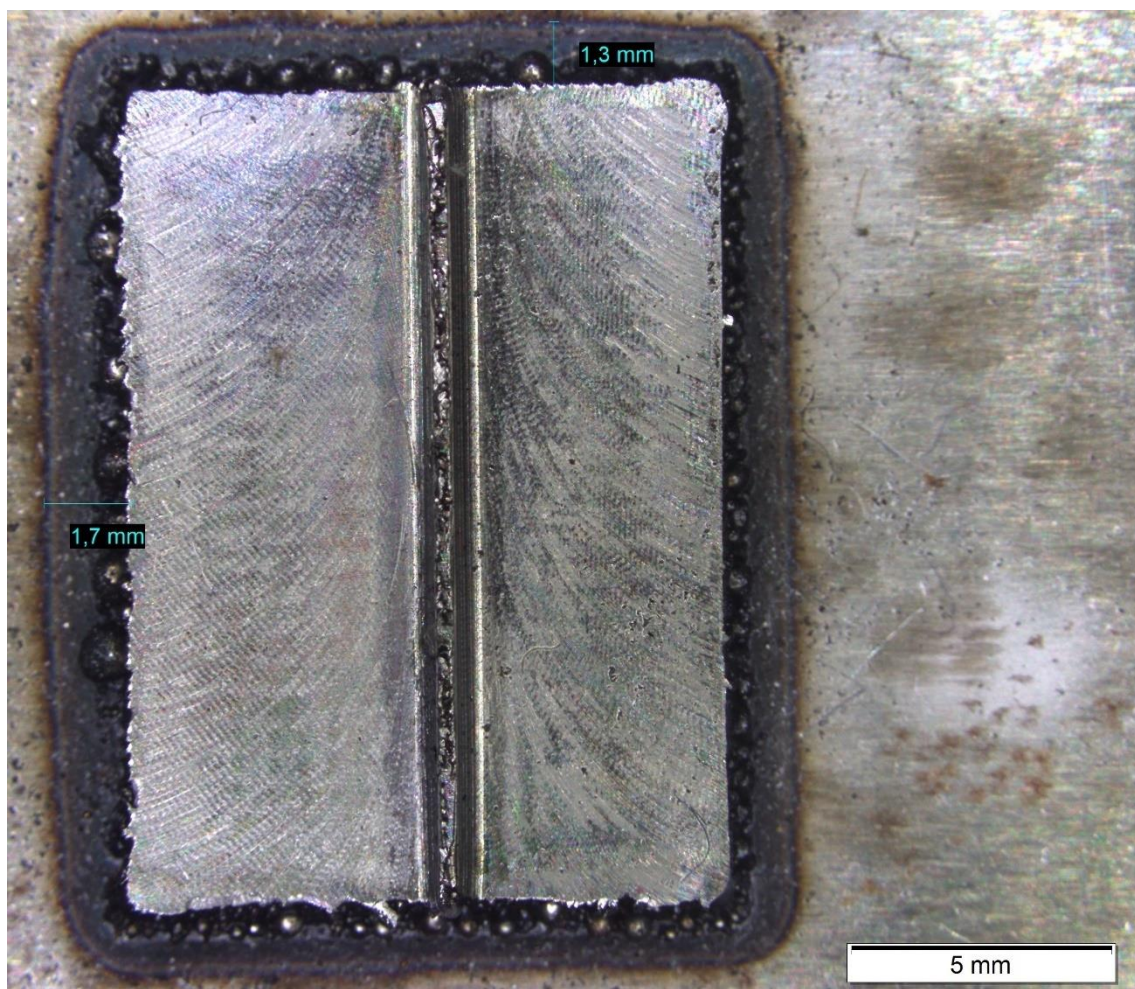
101. Ábra: "2/1"-es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



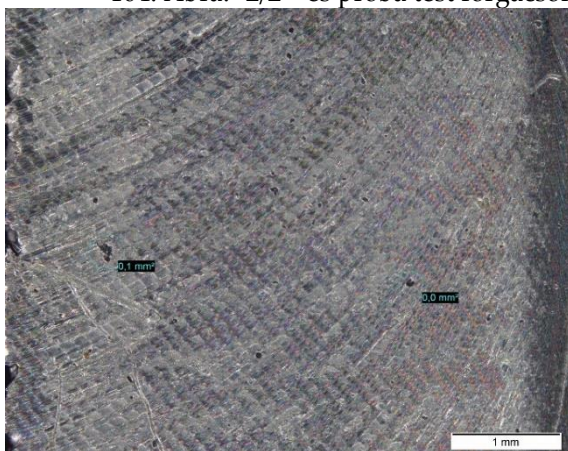
102. Ábra "2/1"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



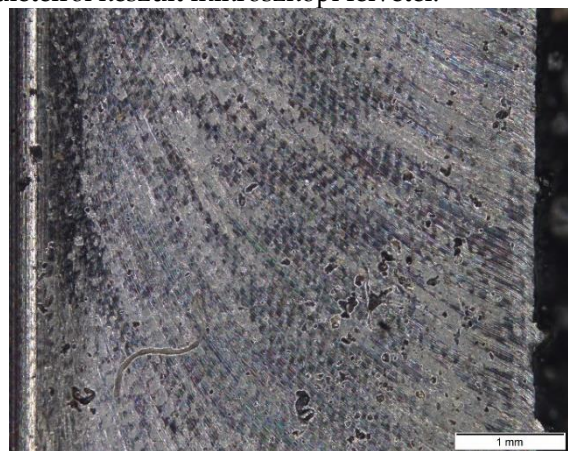
103. Ábra: "2/1"-es próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



104. Ábra: "2/2"-es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



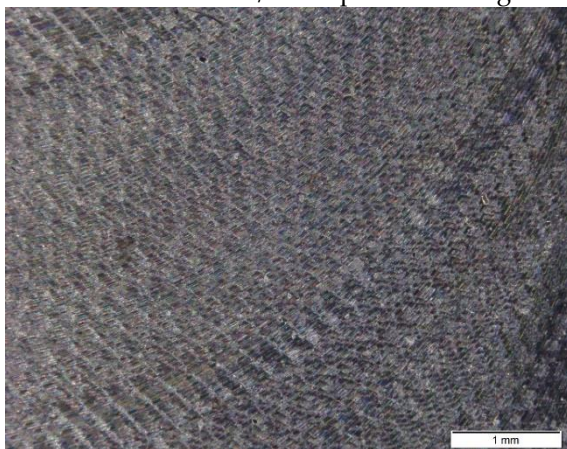
105. Ábra: "2/2"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



106. Ábra: "2/2"-es próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi



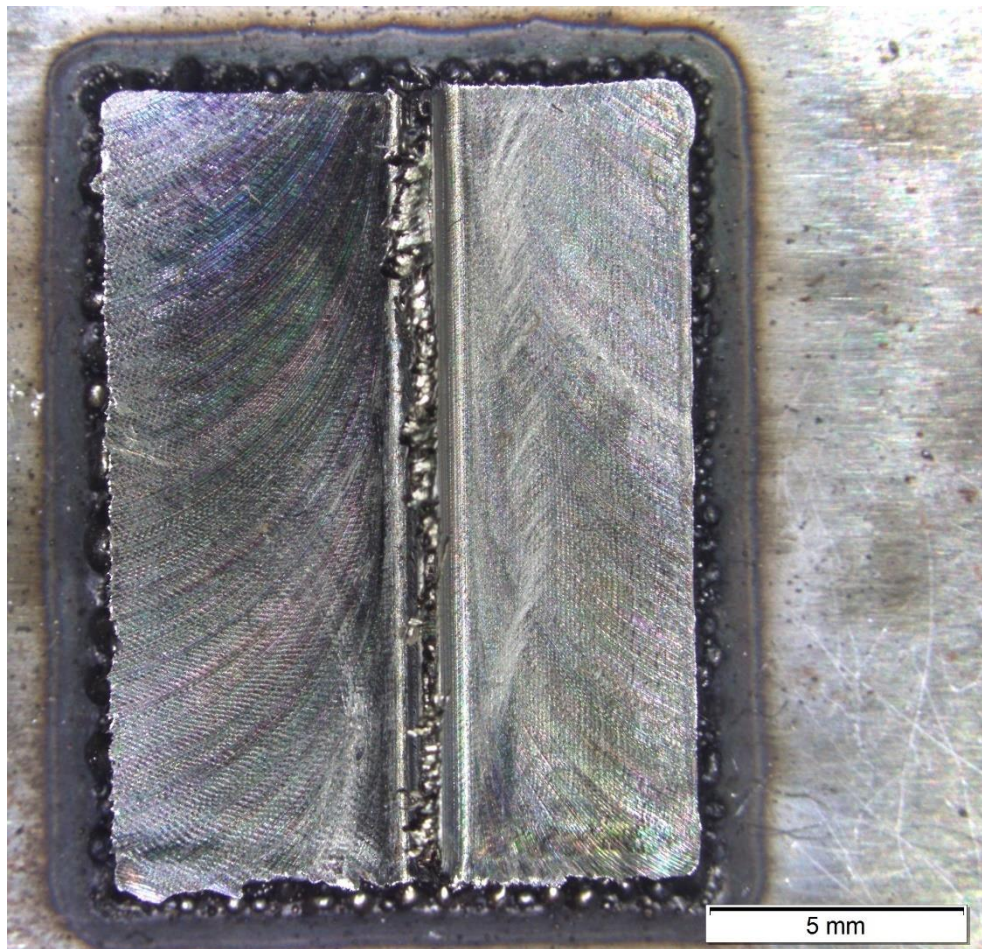
107. Ábra: "2/3"-es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



108. Ábra: "2/3"-as próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



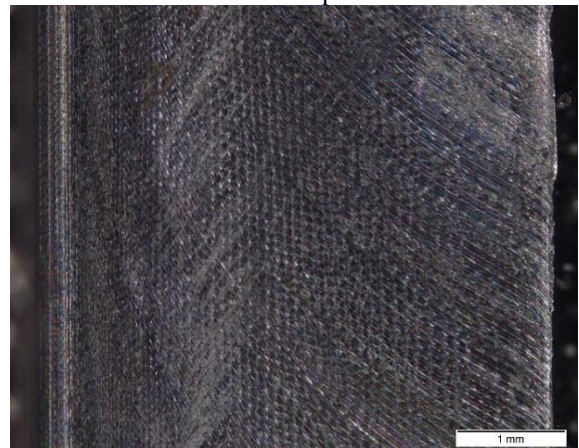
109. Ábra: "2/3"-as próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



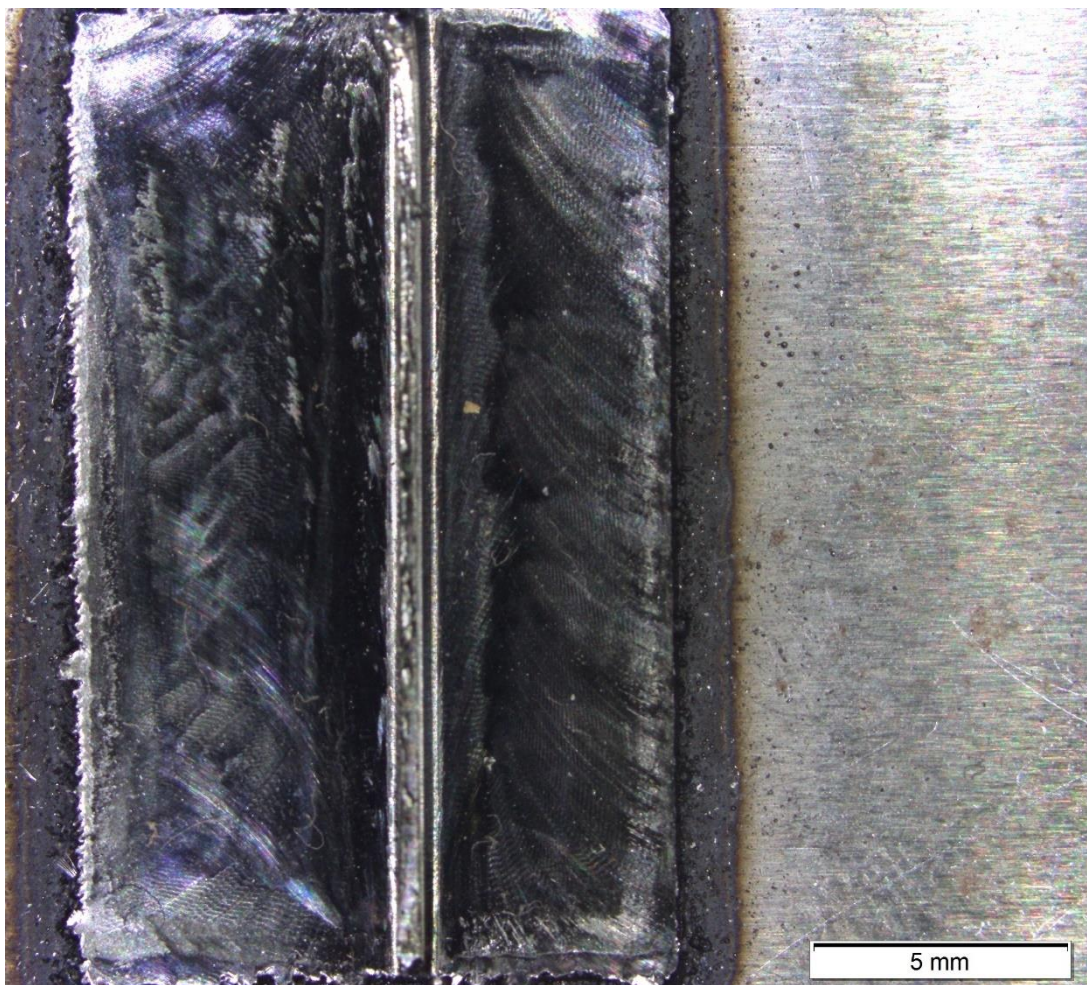
110. Ábra: "3/1" - es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



111. Ábra: "3/1"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



112. Ábra: "3/1"-es próbatest egyenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



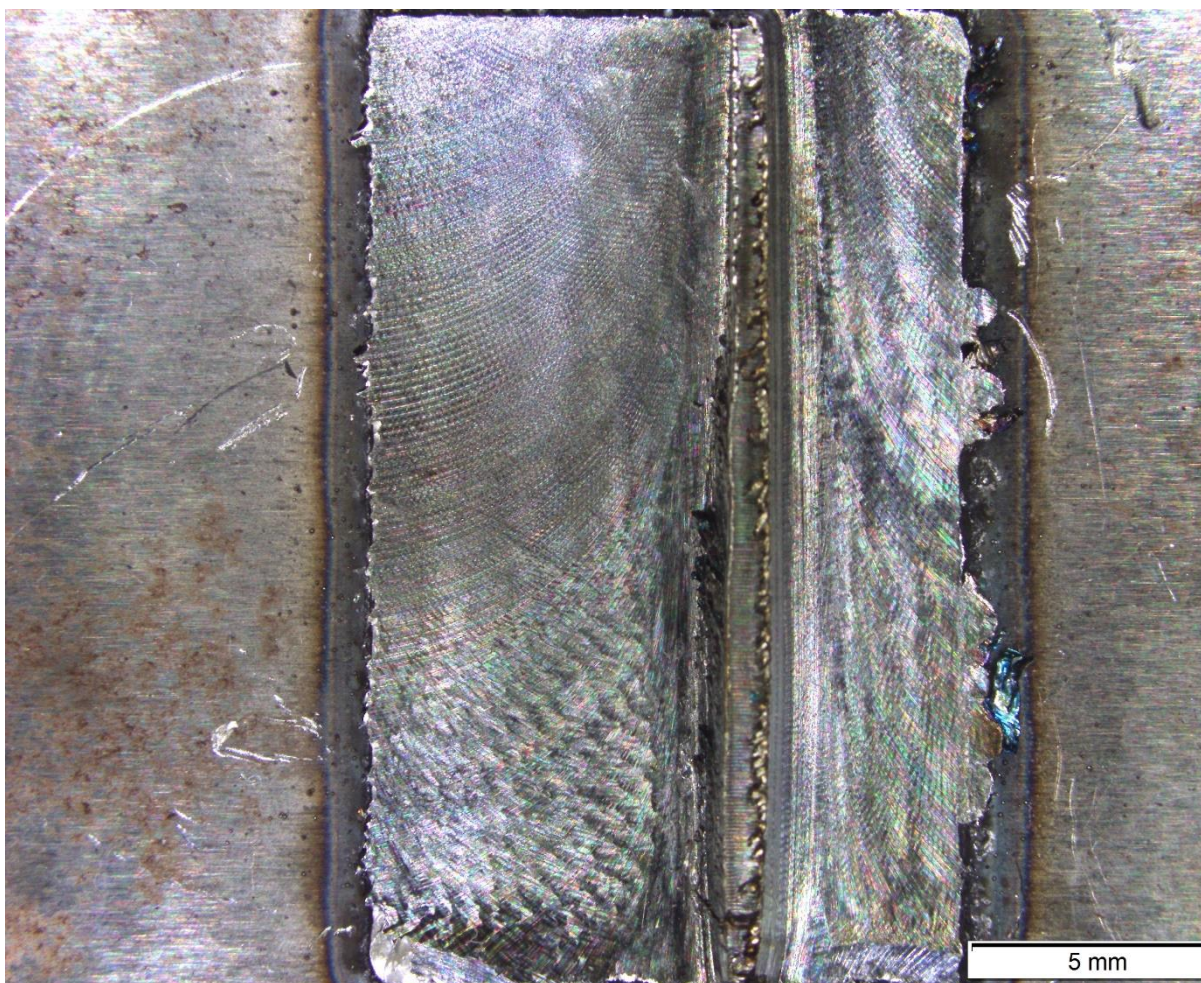
113. Ábra: "3/2" - es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.



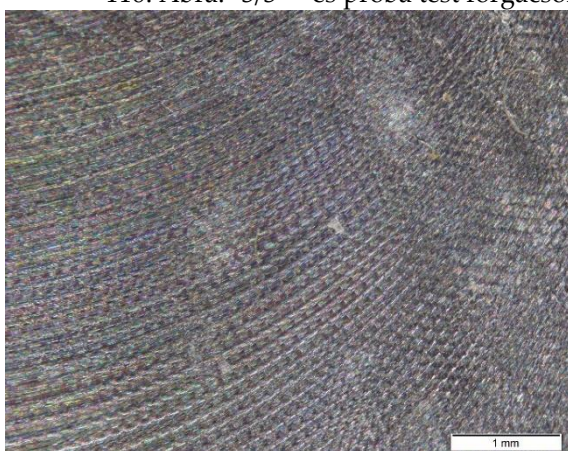
114. Ábra: "3/2"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



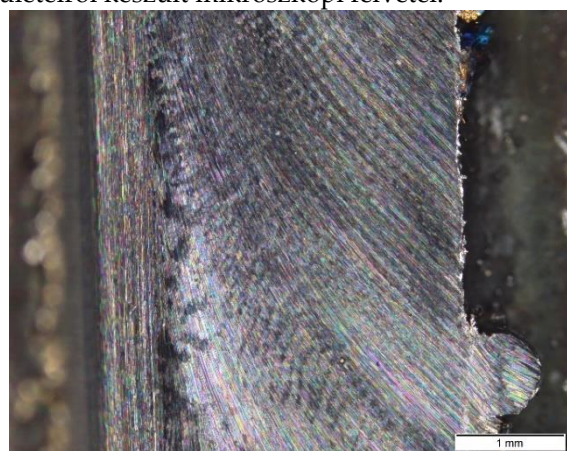
115. Ábra: "3/2"-es próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.



116. Ábra: "3/3" - es próba test forgácsolt felületeiről készült mikroszkópi felvétel.

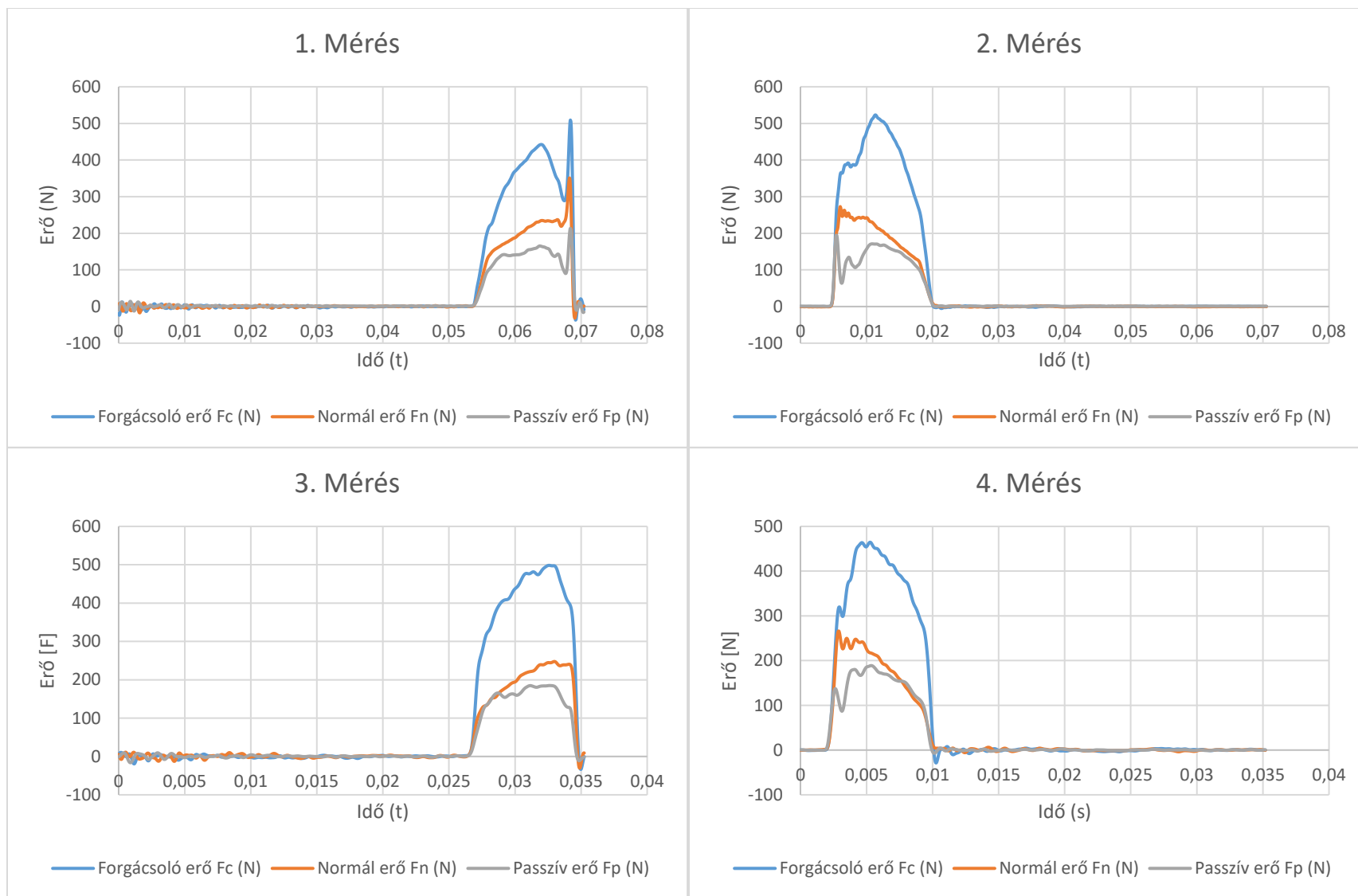


117. Ábra: "3/3"-as próbatest ellenirányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép.

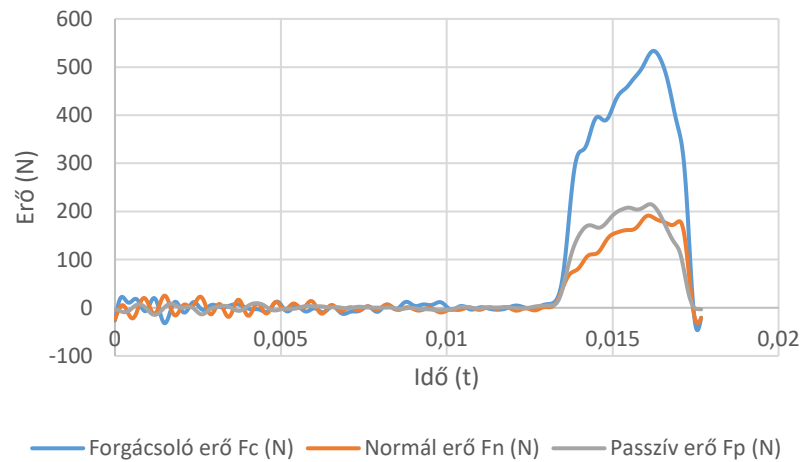


118. Ábra: "3/3"-as próbatest egyenirányú irányú marással előállított felületéről készült mikroszkópi kép

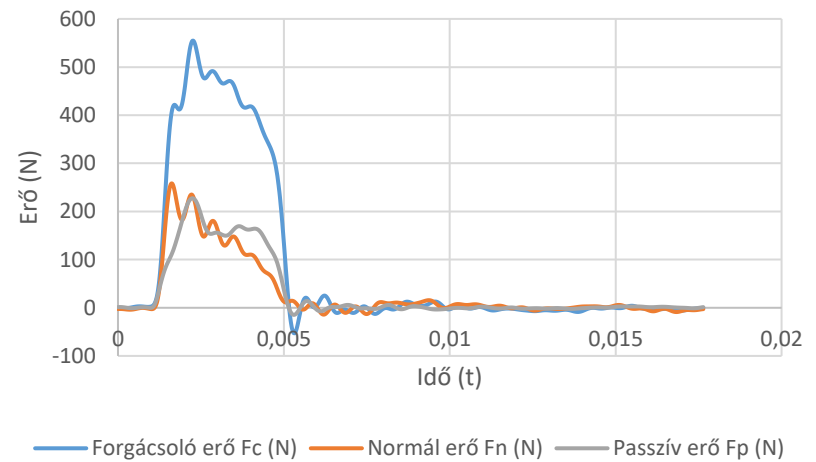
7.13. Melléklet: Mért forgácsoló erő komponensek grafikonon ábrázolva



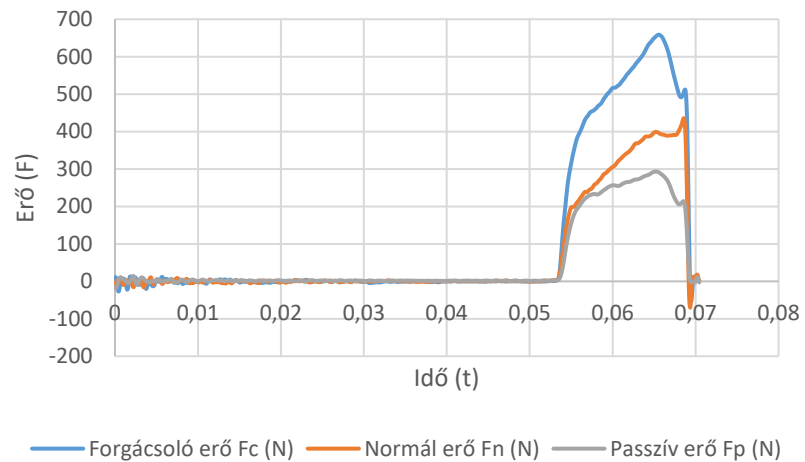
5. Mérés



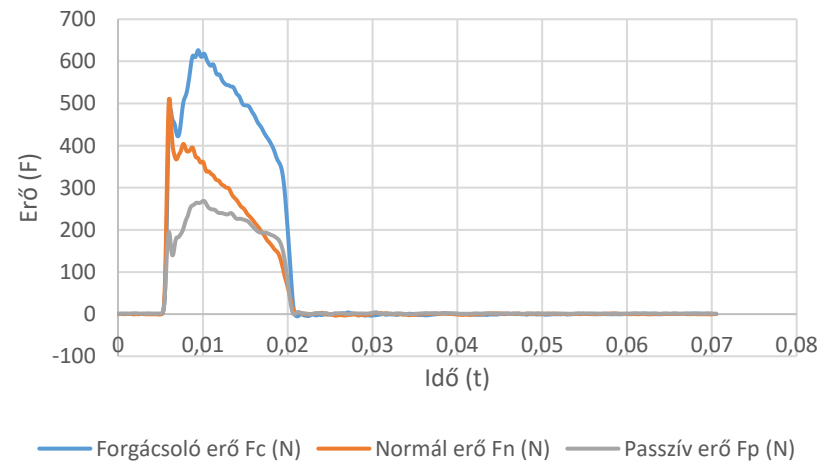
6. Mérés



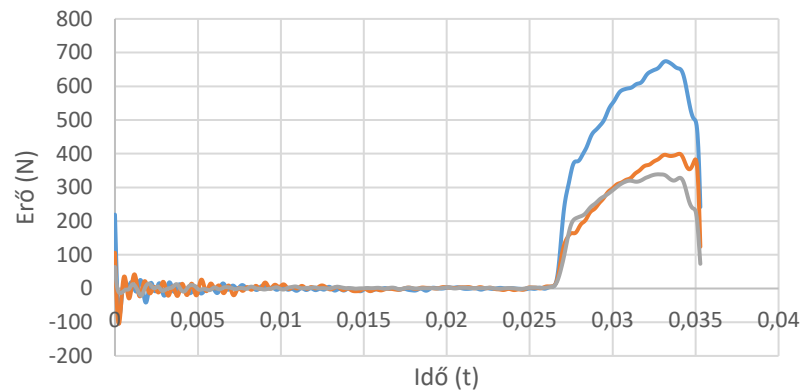
7. Mérés



8. Mérés

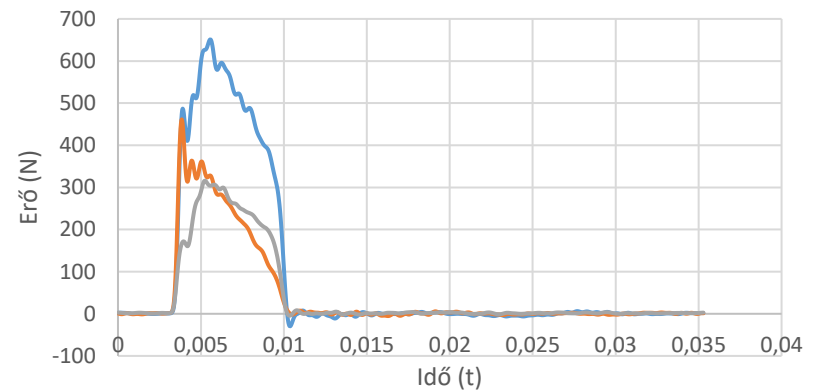


9. Mérés



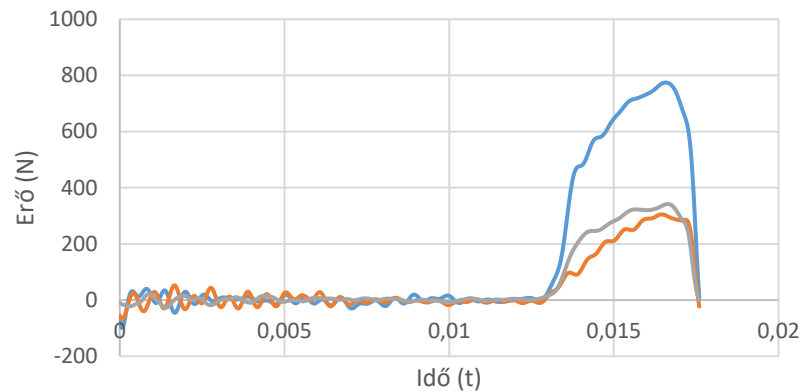
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

10. Mérés



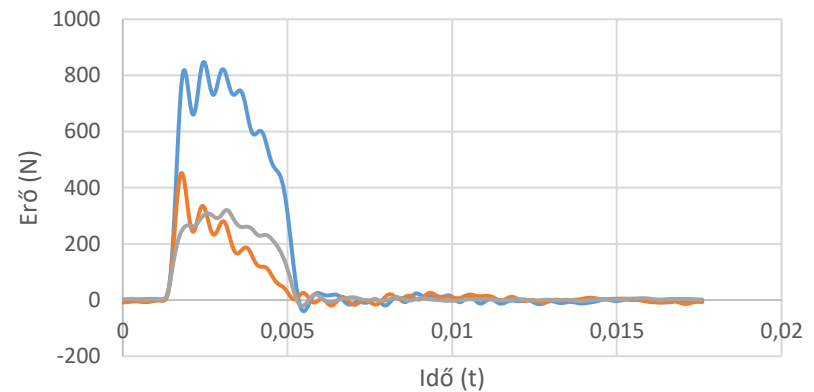
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

11. Mérés



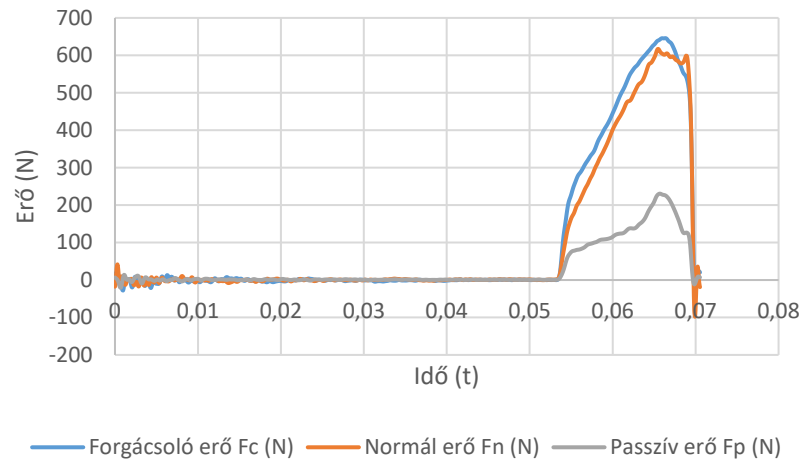
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

12. Mérés

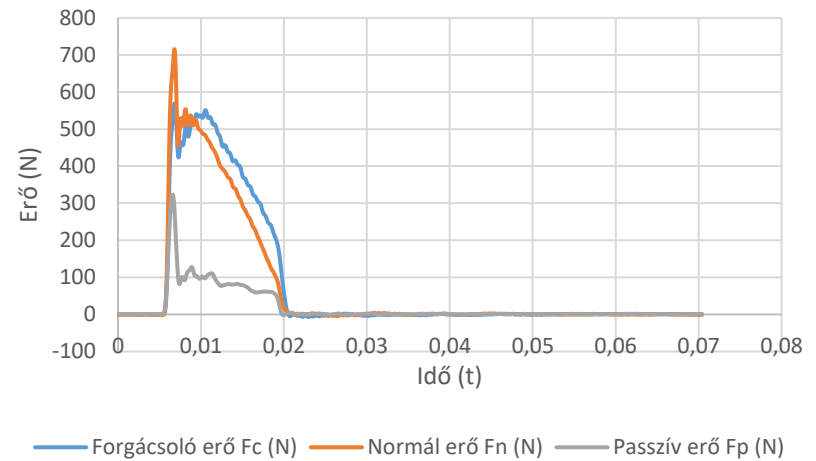


— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

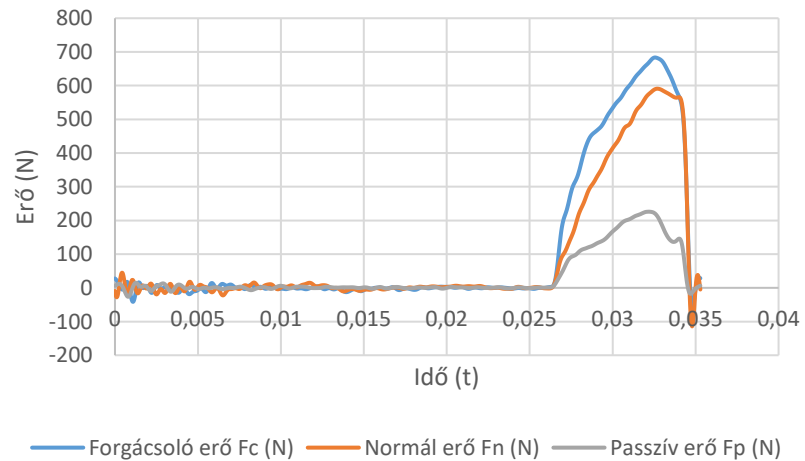
13. Mérés



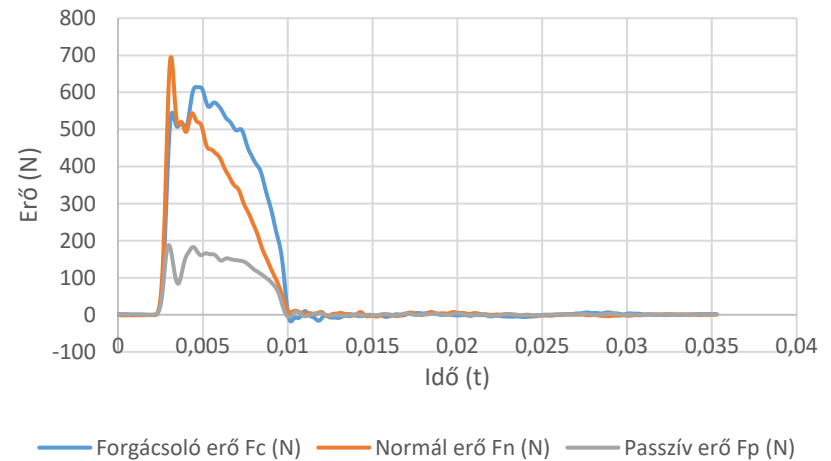
14. Mérés



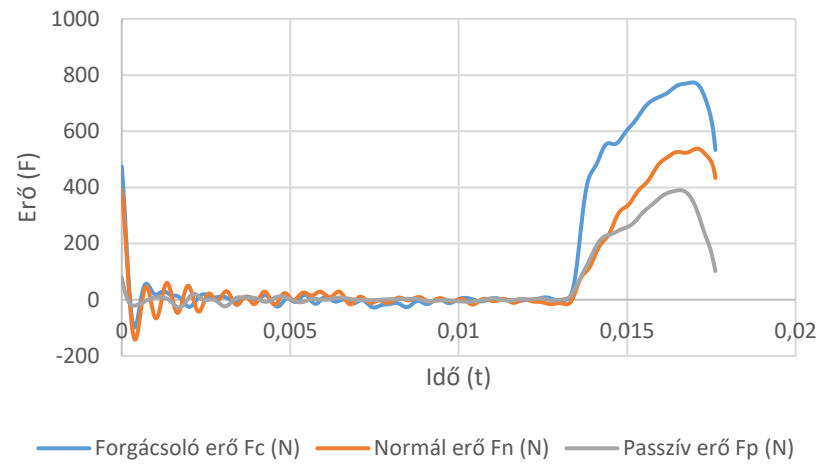
15. Mérés



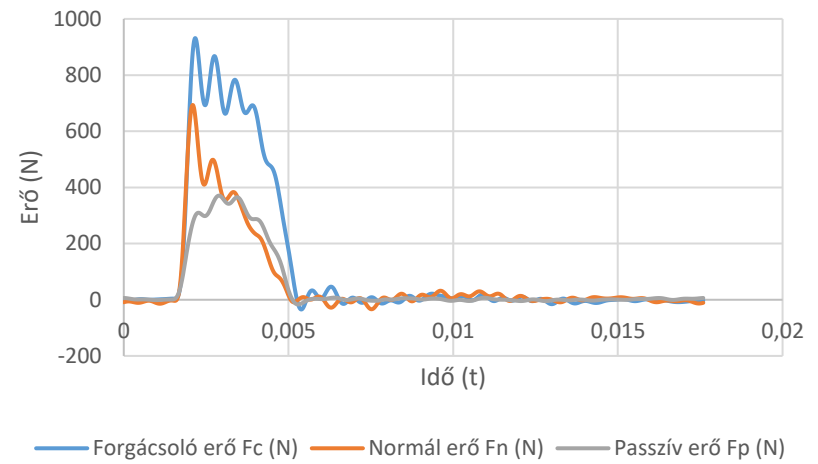
16. mérés



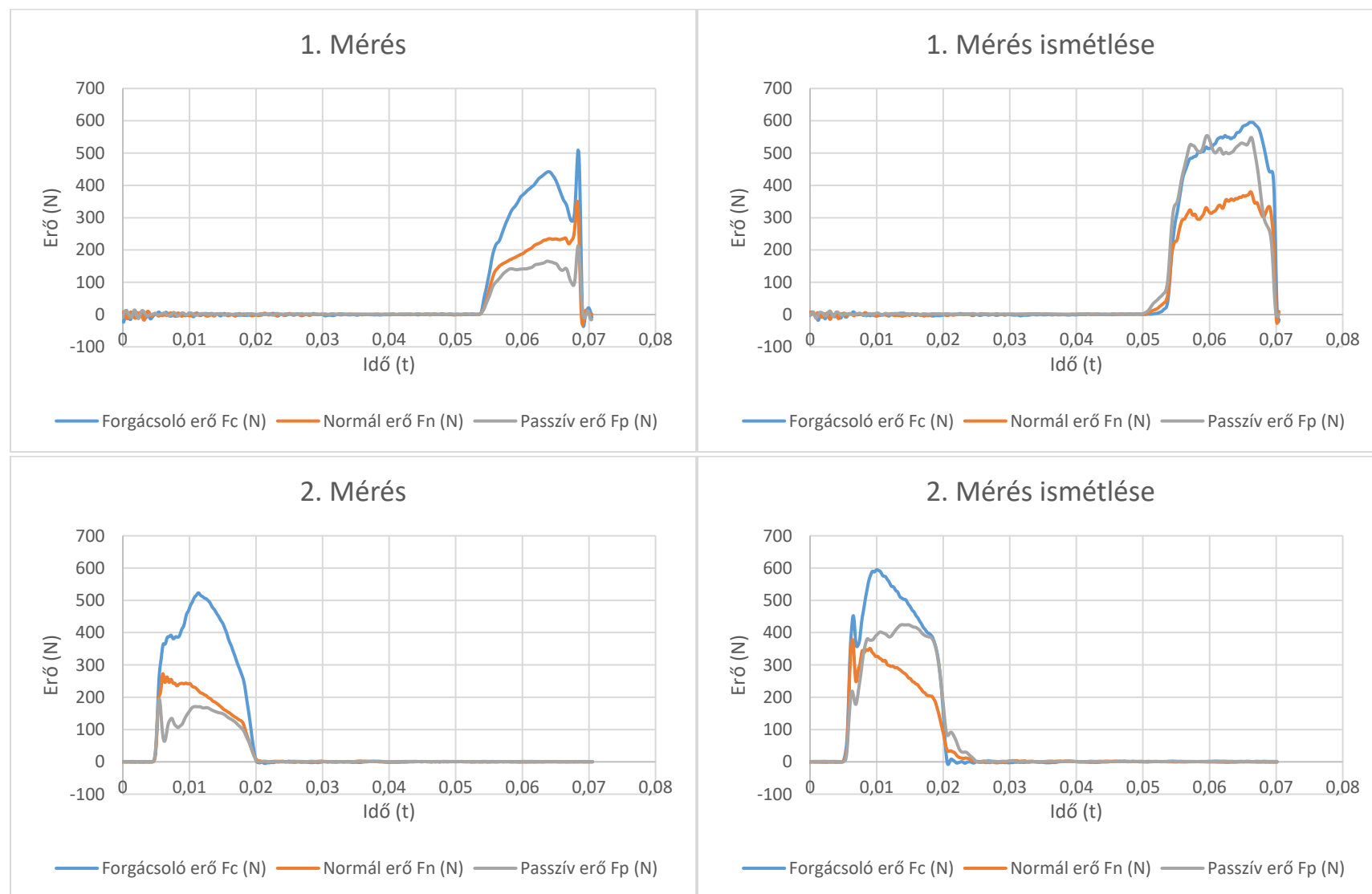
17. Mérés



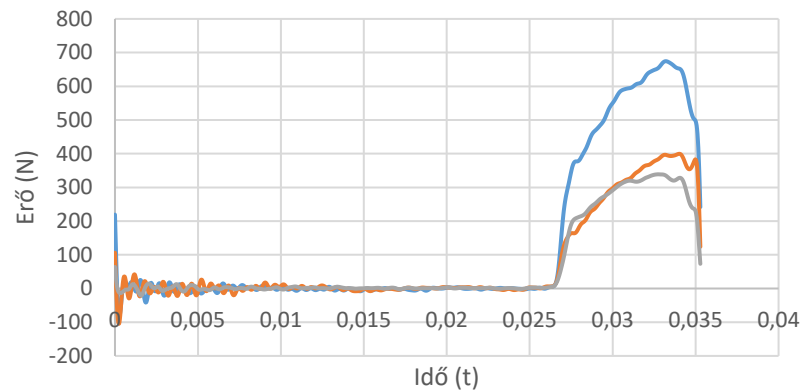
18. Mérés



7.14. Melléklet: A mért forgácsoló erők és az ismétlő mérések grafikonon ábrázolva

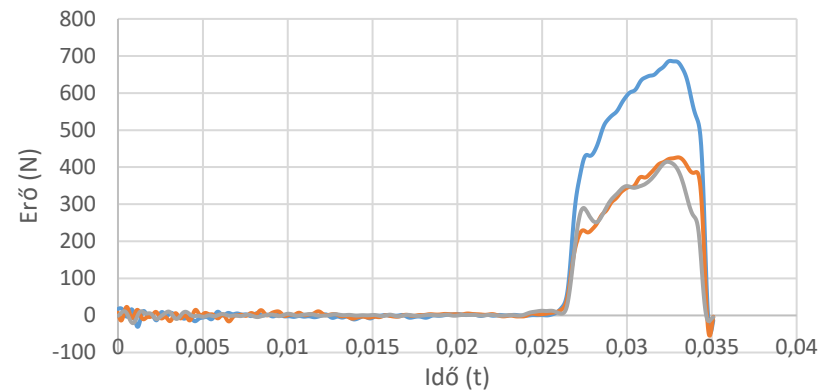


9. Mérés



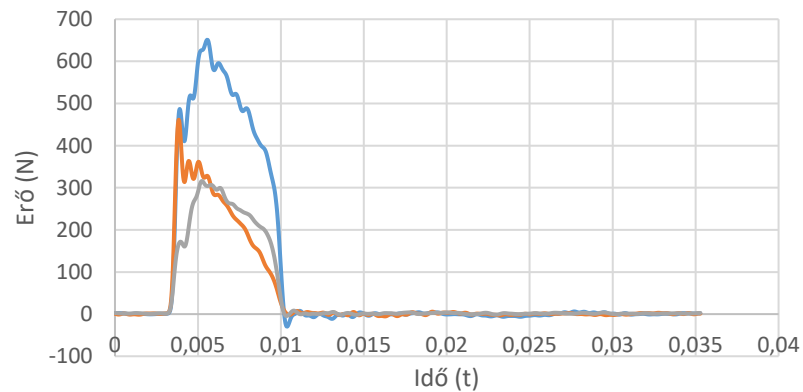
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

9. Mérés ismétlése



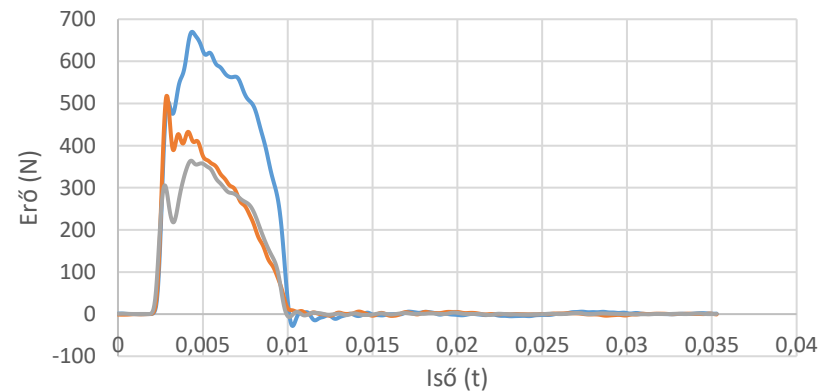
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

10. Mérés



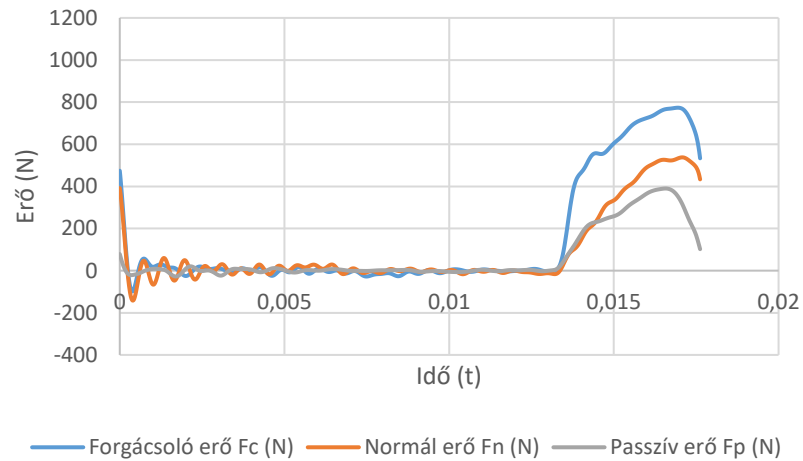
— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

10. Mérés ismétlése

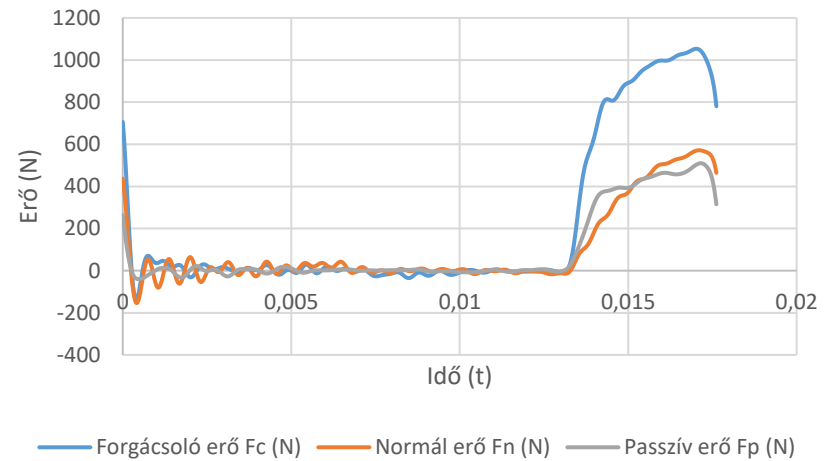


— Forgácsoló erő F_c (N) — Normál erő F_n (N) — Passzív erő F_p (N)

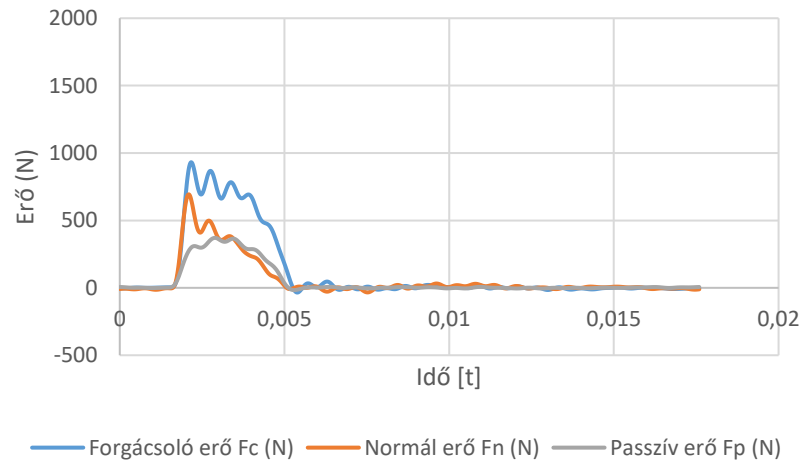
17. Mérés



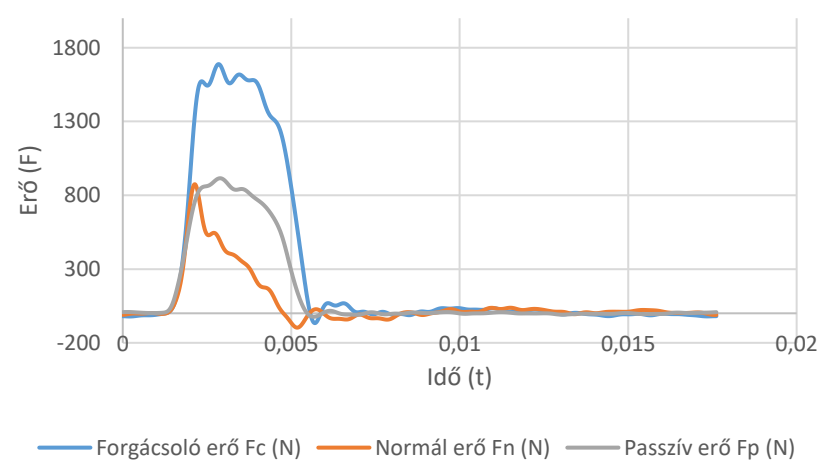
17. Mérés Ismétlése



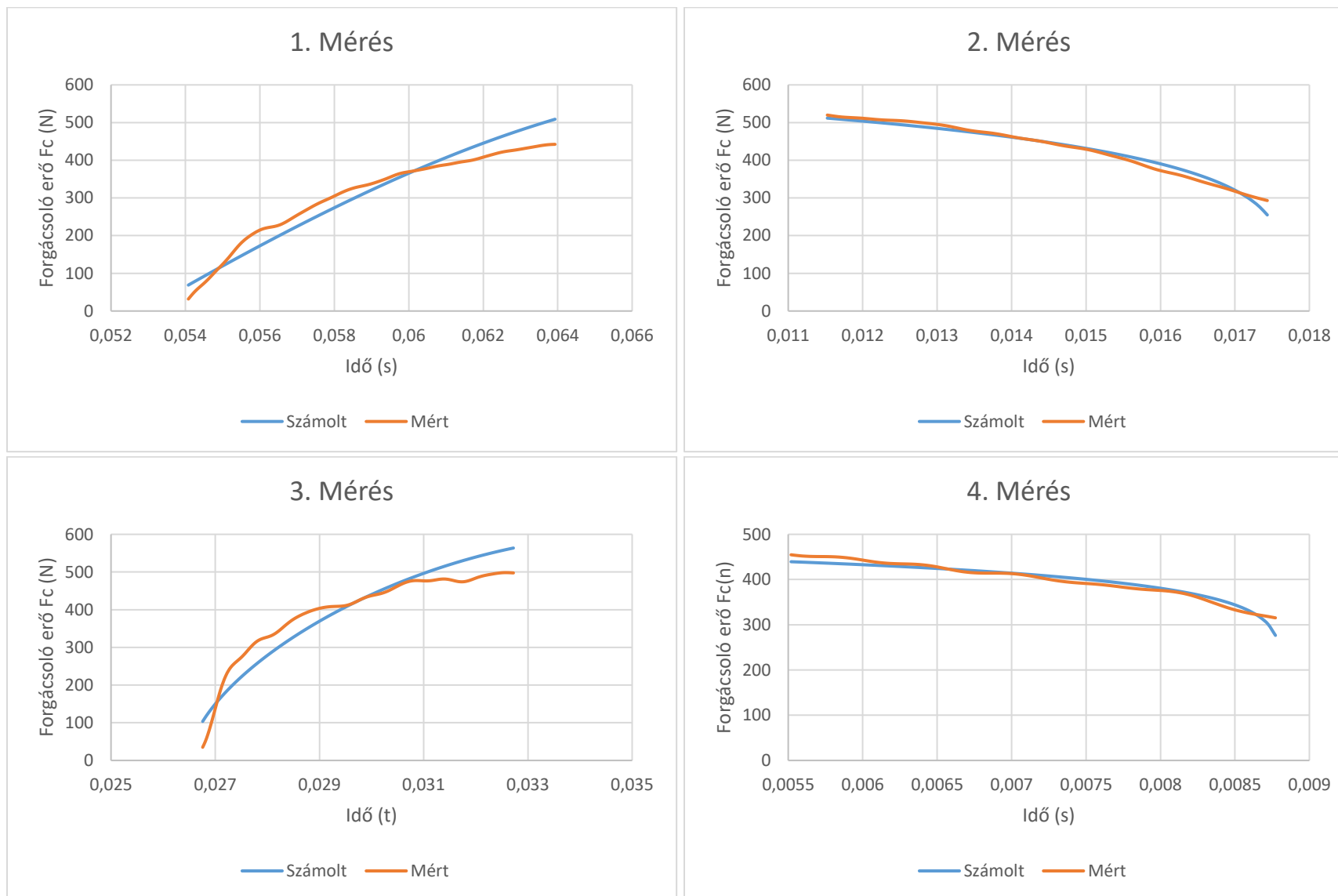
18. Mérés



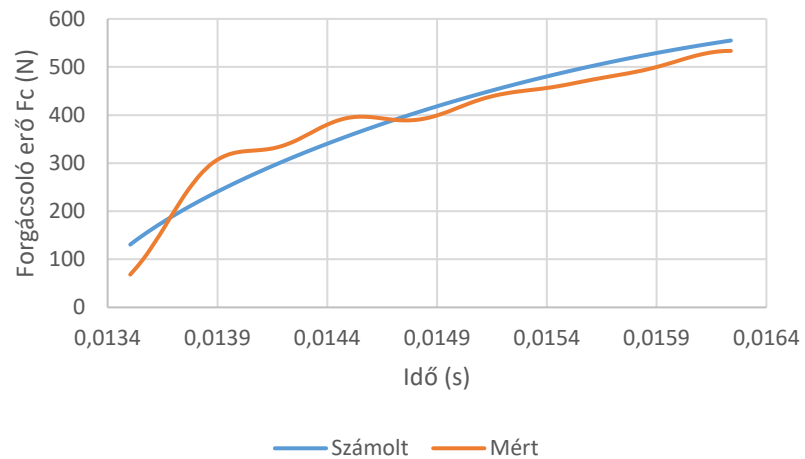
18. Mérés ismétlése



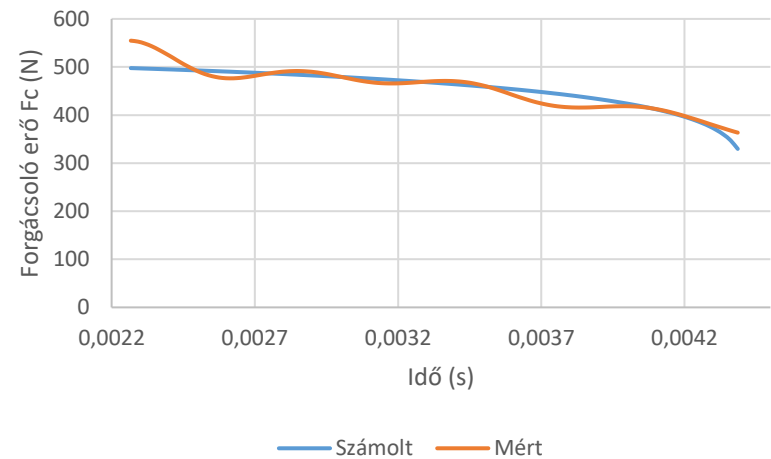
7.15. Melléklet: A mért forgácsoló erők és a számolt forgácsoló erők grafikonon ábrázolva



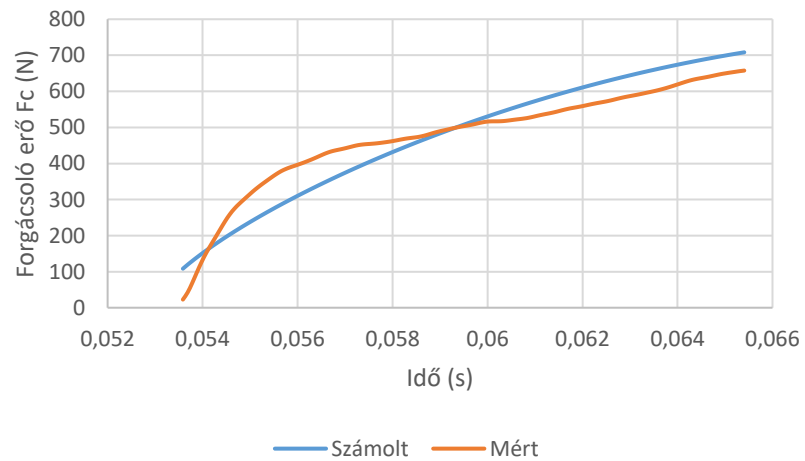
5. Mérés



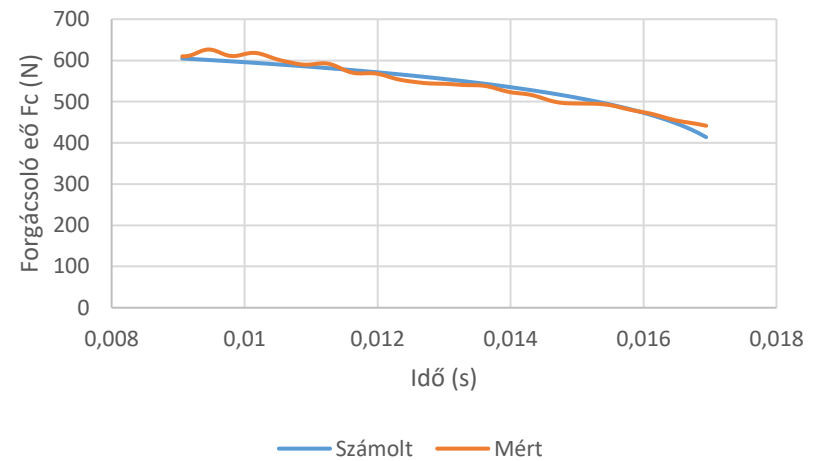
6. Mérés



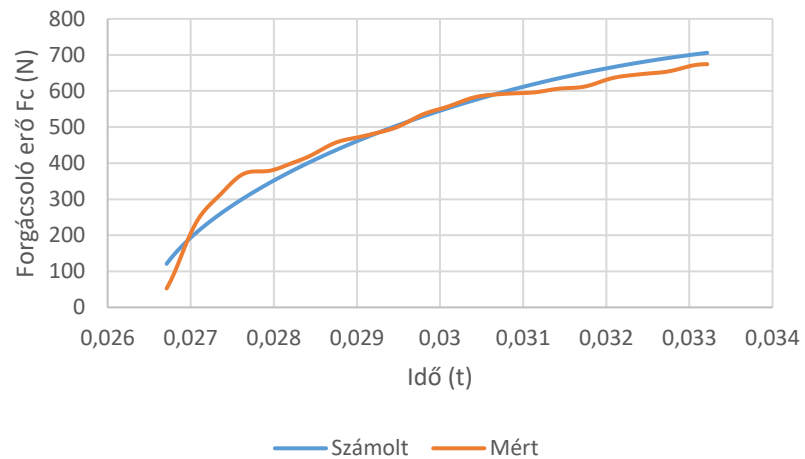
7. Mérés



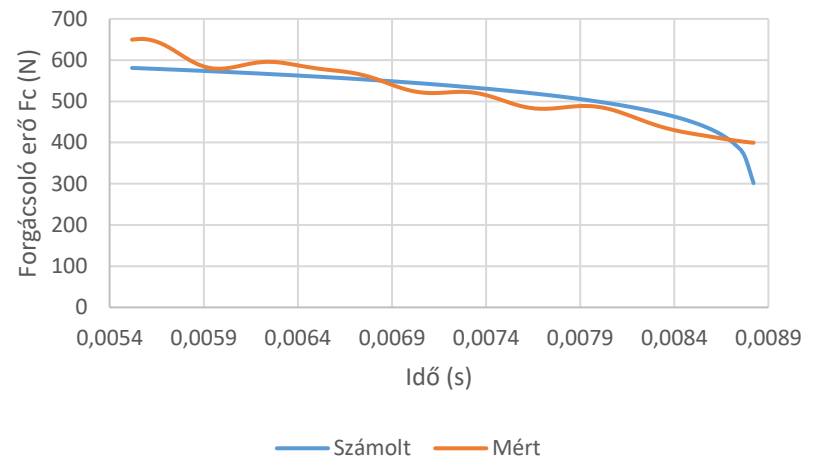
8. Mérés



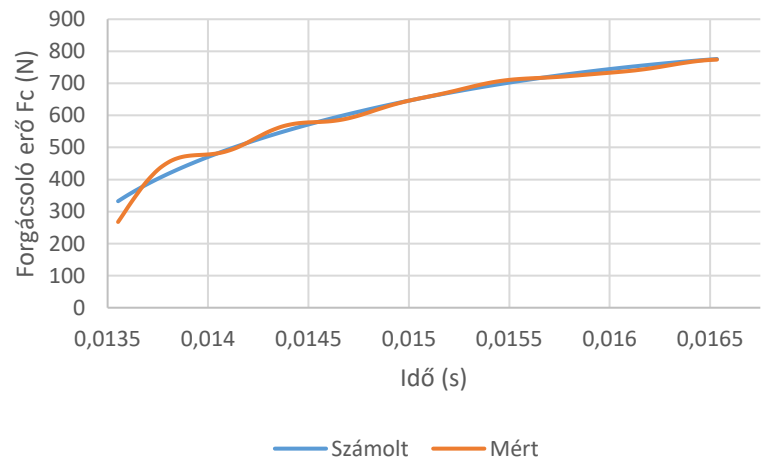
9. Mérés



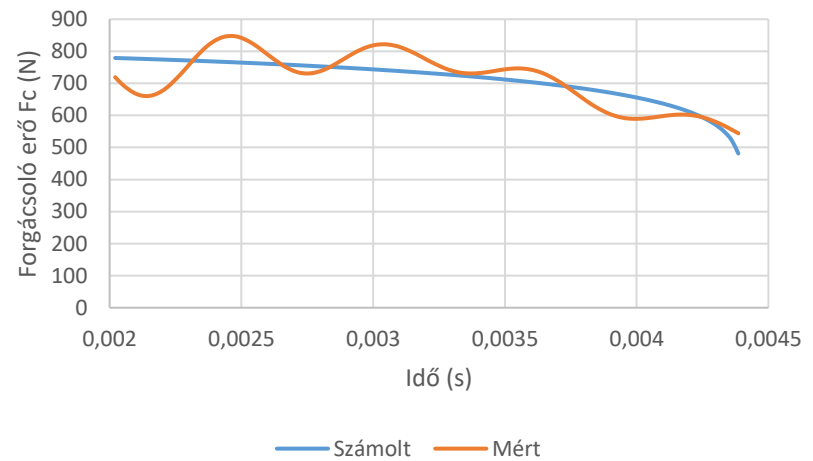
10. Mérés



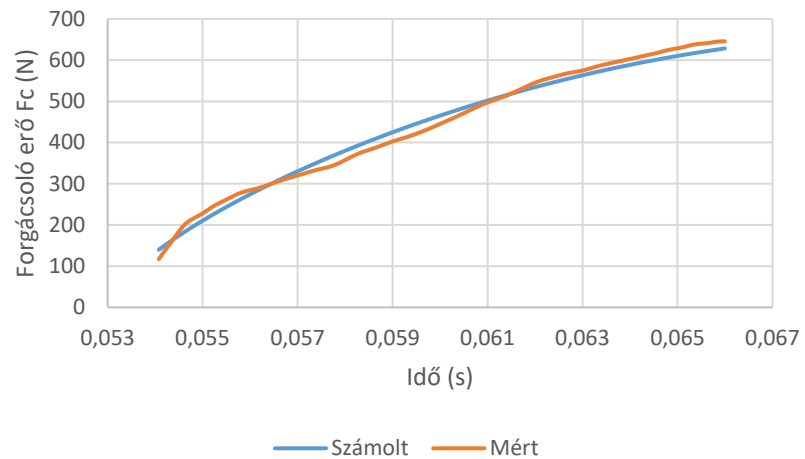
11. Mérés



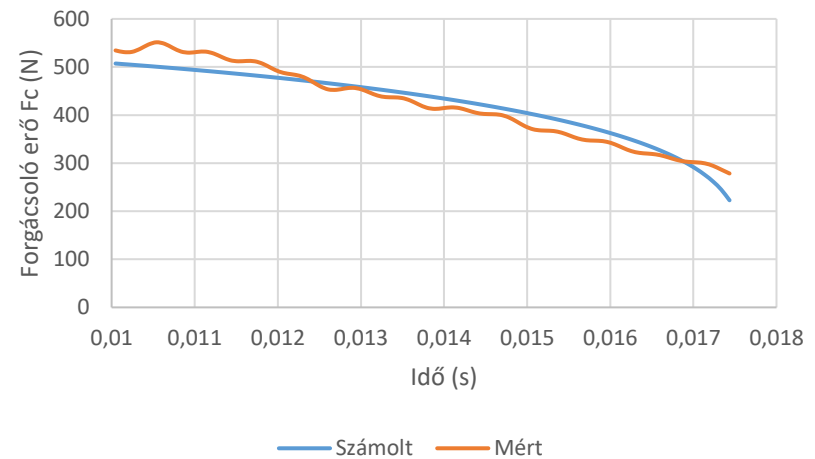
12. Mérés



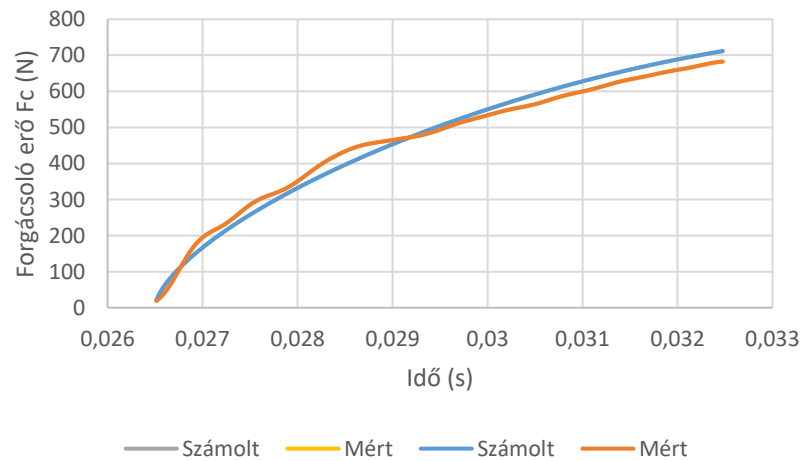
13. Mérés



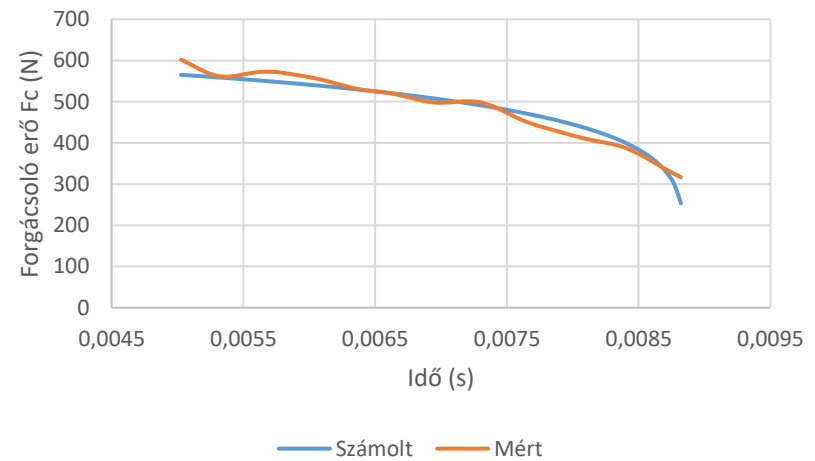
14. mérés



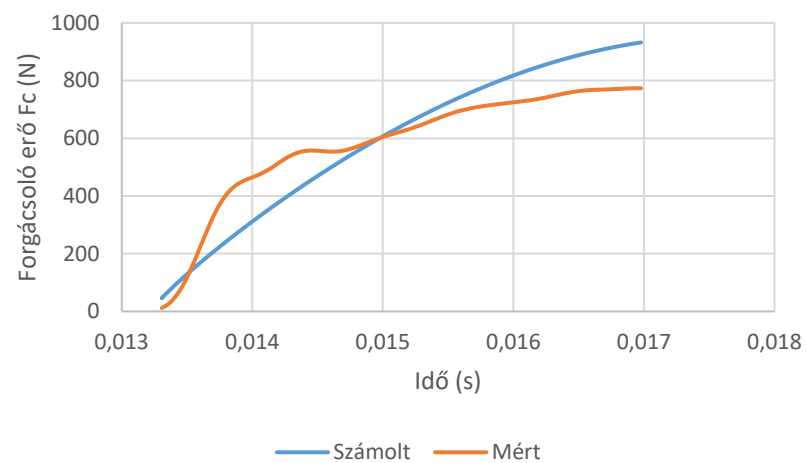
15. Mérés



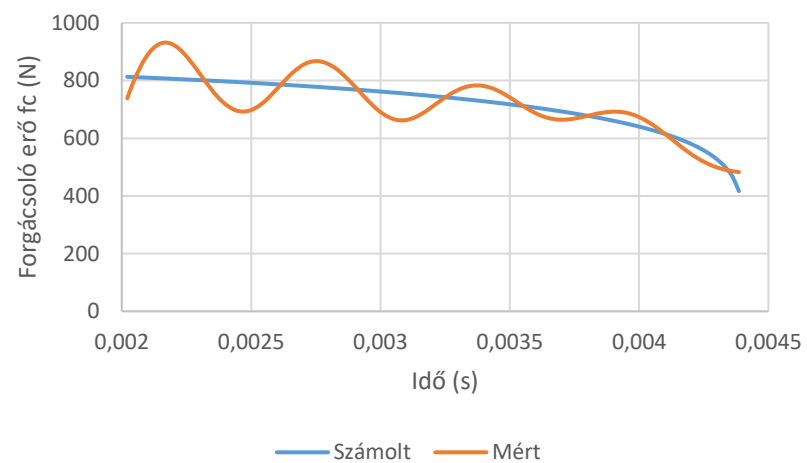
16. Mérés



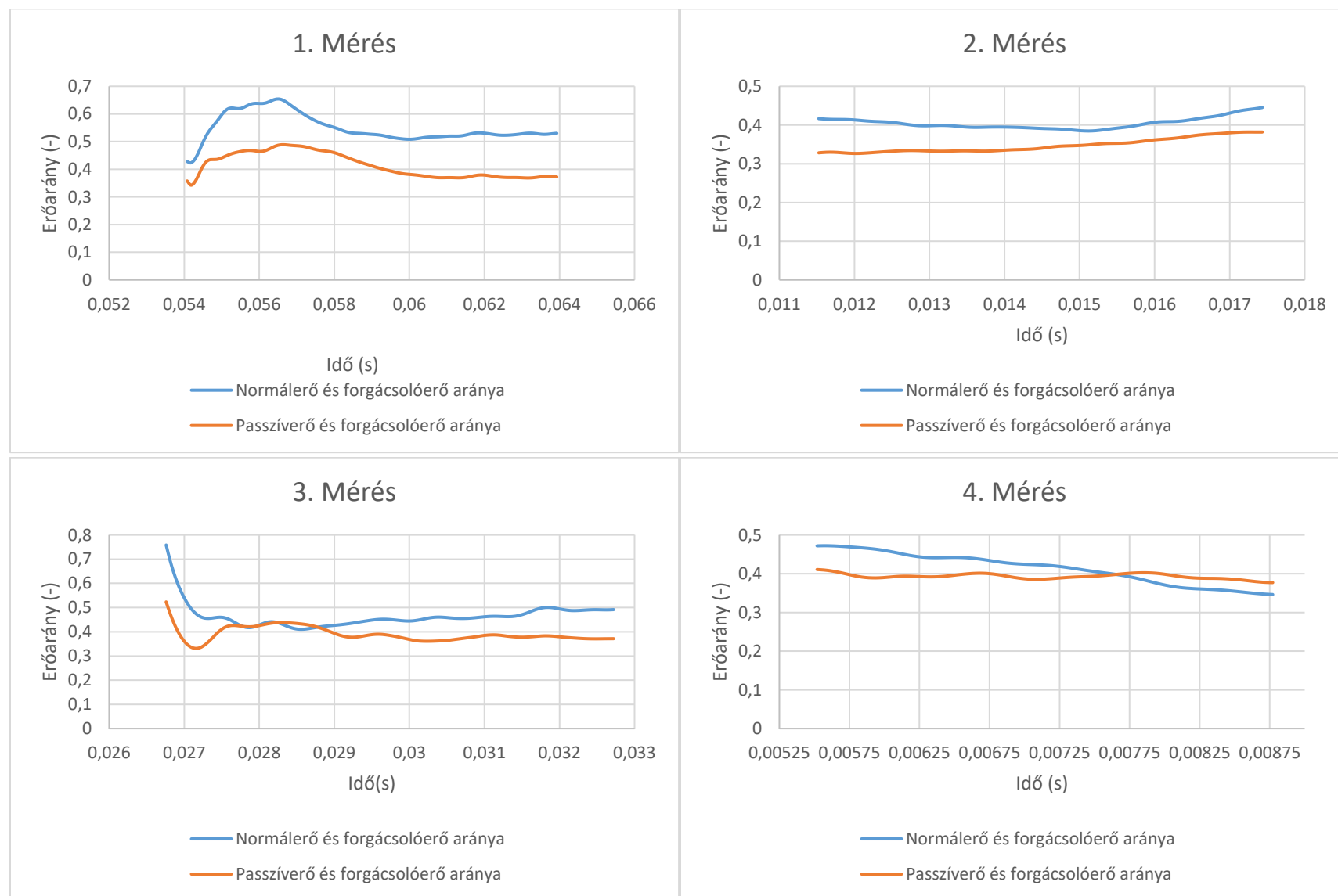
17. Mérés



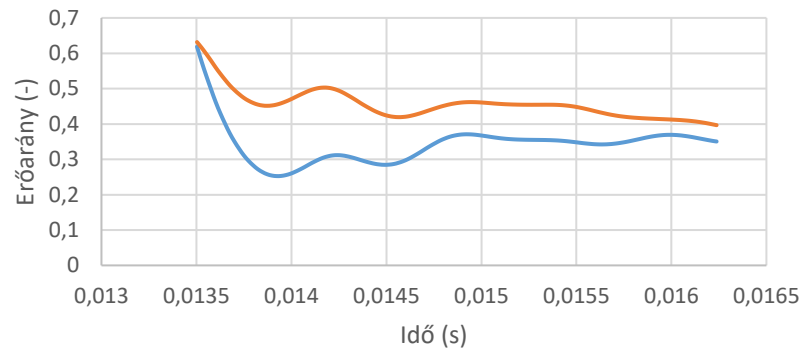
18. Mérés



7.16. Melléklet: Erőarányok grafikonon történő ábrázolása

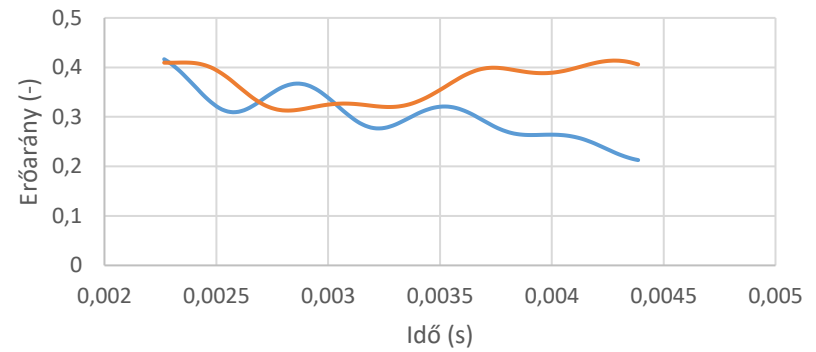


5. Mérés



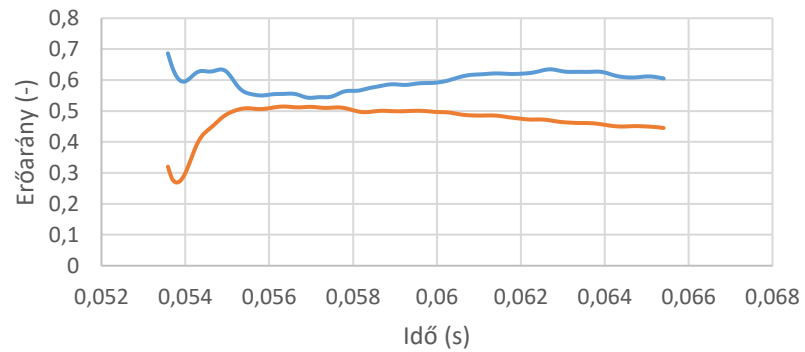
— Normálerő és forgácsolóerő aránya
— Passzíverő és forgácsolóerő aránya

6. Mérés



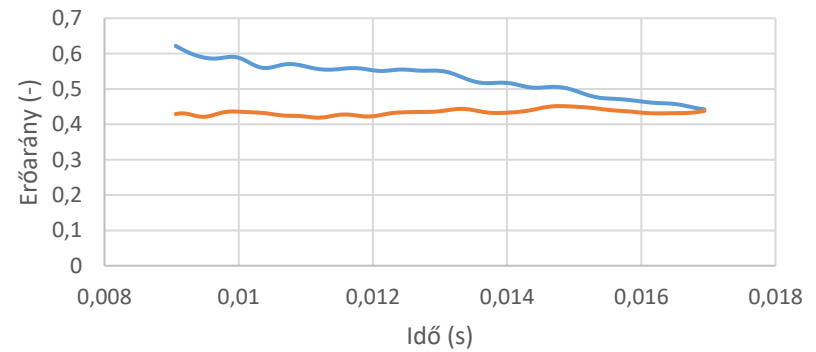
— Normálerő és forgácsolóerő aránya
— Passzíverő és forgácsolóerő aránya

7. Mérés



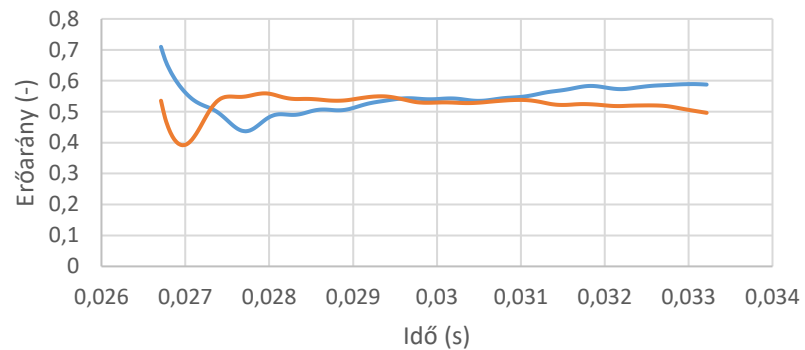
— Normálerő és forgácsolóerő aránya
— Passzíverő és forgácsolóerő aránya

8. Mérés

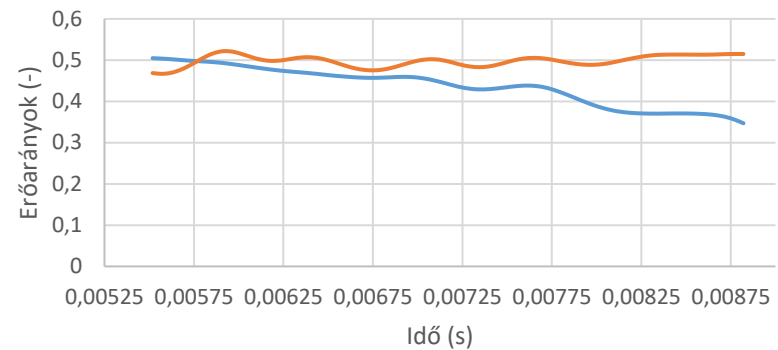


— Normálerő és forgácsolóerő aránya
— Passzíverő és forgácsolóerő aránya

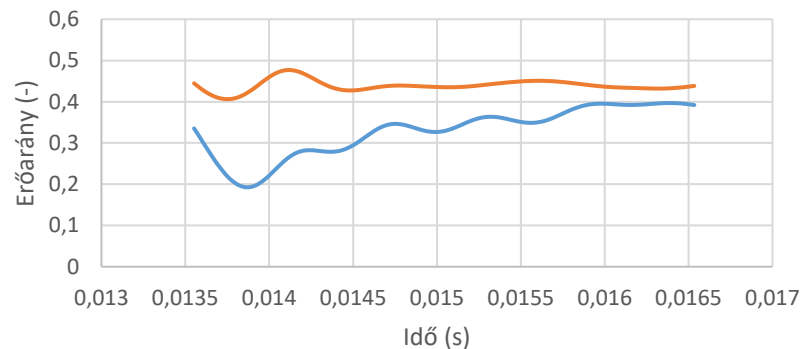
9. Mérés



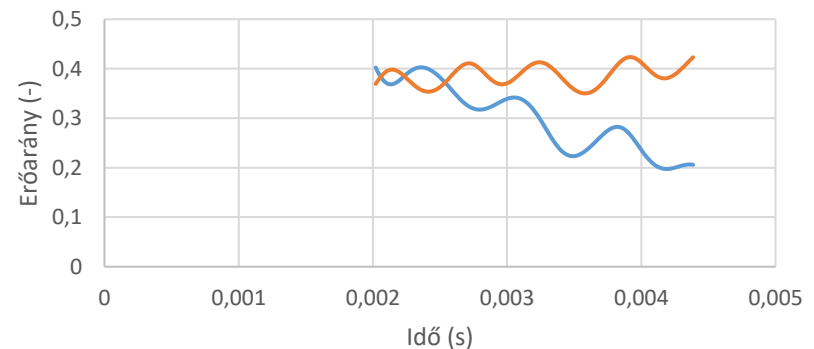
10. Mérés



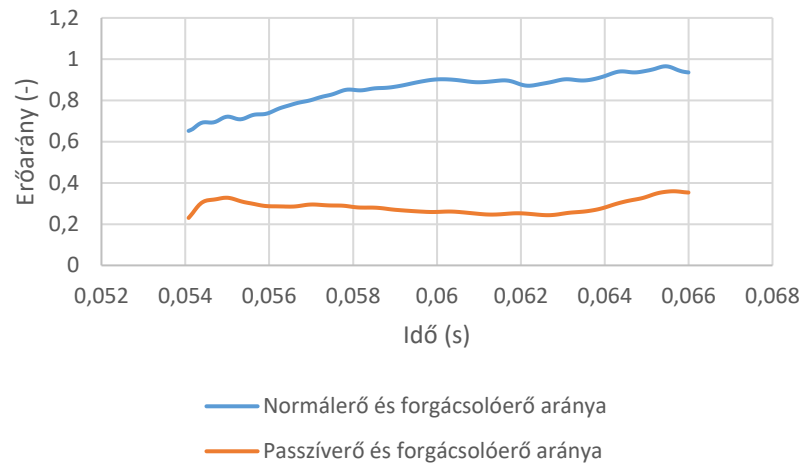
11. Mérés



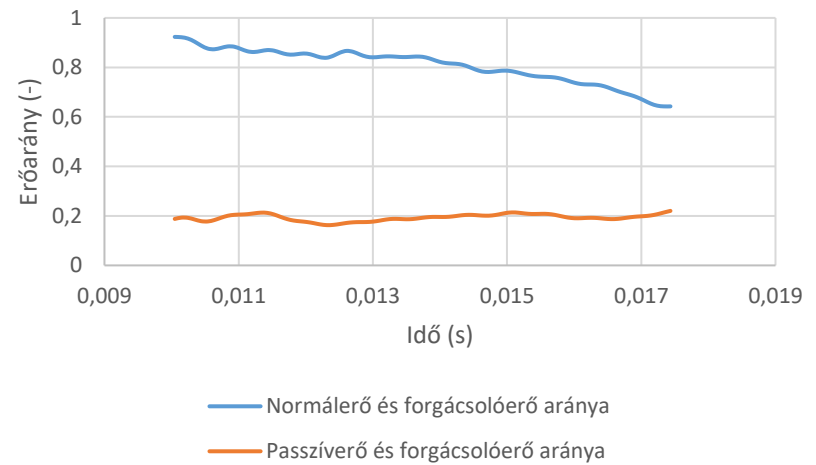
12. Mérés



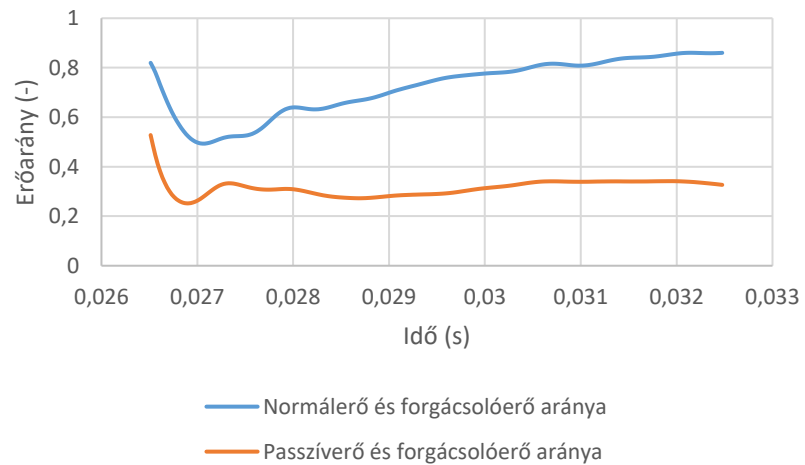
13. Mérés



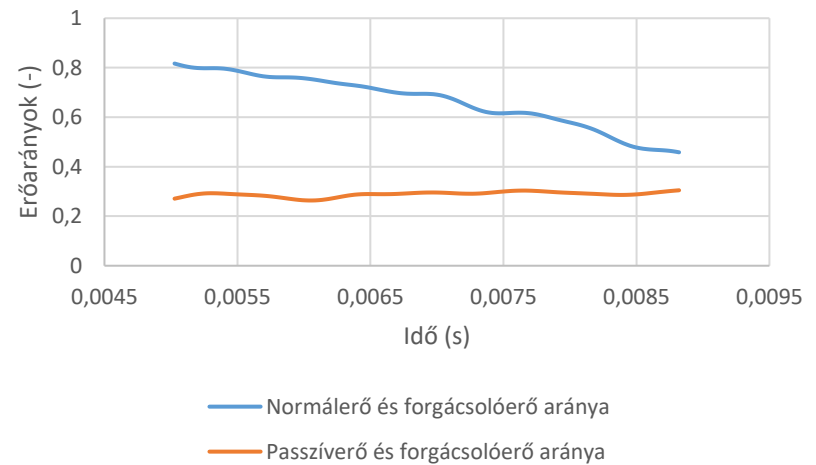
14. Mérés

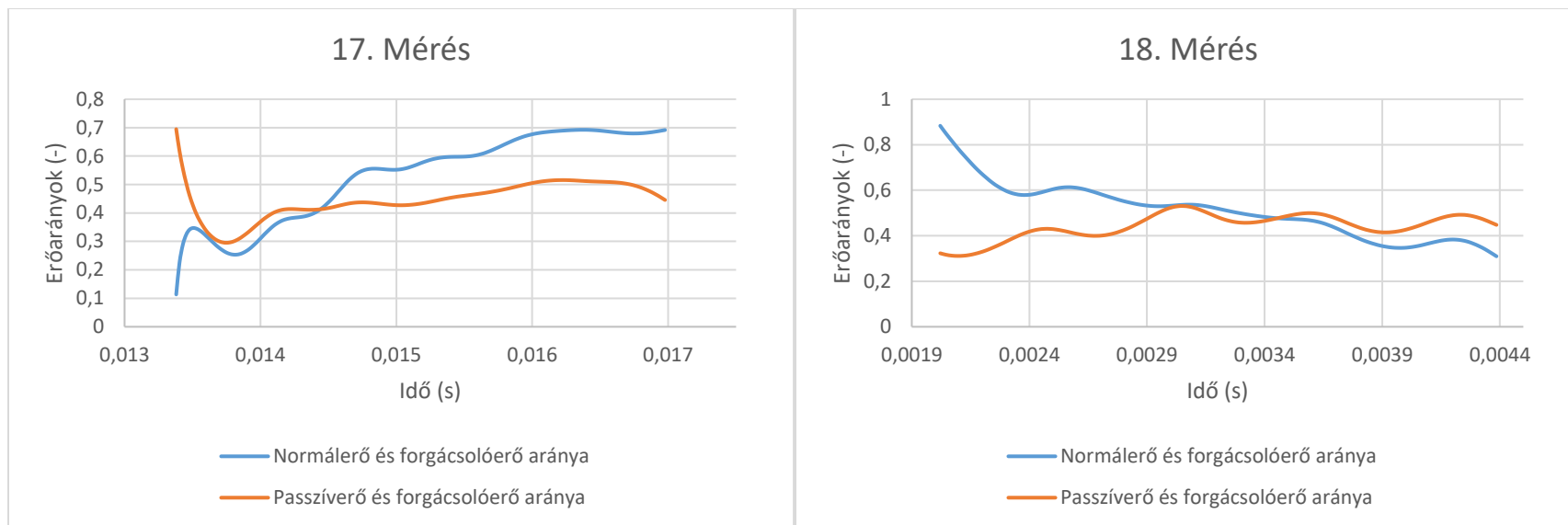


15. Mérés



16. Mérés





7.17. Melléklet: Forgácsolási folyamatok – GY1 laborgyakorlat útmutató