



---

# ADDITÍV ÚTON GYÁRTOTT MELEGALAKÍTÓ SZERSZÁMACÉL FORGÁCSOLHATÓSÁGI VIZSGÁLATA

---

TDK dolgozat



SOLTI KÁLMÁN

II. ÉVES MSC. GÉPÉSZMÉRNÖK HALLGATÓ

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

## Tartalom

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Absztrakt .....                                                                                                                  | 4  |
| Irodalom kutatás.....                                                                                                            | 4  |
| Forgácsolhatóság fogalma .....                                                                                                   | 4  |
| Forgácsoló erők mérése marásnál .....                                                                                            | 5  |
| H13-as forgácsolhatósági vizsgálata a nemzetközi szakirodalomban .....                                                           | 6  |
| Lézersugaras hegesztő berendezés bemutatása.....                                                                                 | 20 |
| Alkalmazott additív gyártási technológia bemutatása .....                                                                        | 20 |
| LRS EVO Diodeline .....                                                                                                          | 21 |
| Kísérleti terv.....                                                                                                              | 22 |
| Additív technológiai paraméterek meghatározása .....                                                                             | 22 |
| Forgácsoló erő mérés .....                                                                                                       | 24 |
| Előkészület a forgácsolhatósági vizsgálatokhoz.....                                                                              | 26 |
| Additív technológiai paraméterek meghatározása, melyek a geometriailag kielégítő pontosságú gyártást teszik lehetővé .....       | 26 |
| Lézersugár teljesítménye – Hegesztőfej sebessége H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál .....                        | 26 |
| Lézersugár teljesítménye – Lézersugár átmérője a fókuszpontban H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál .....          | 27 |
| Lézersugár teljesítménye – Nyomtatási réteg vastagsága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál .....                  | 27 |
| Lézersugár teljesítménye – egyrétegen két vonal közötti osztás nagysága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál ..... | 28 |
| Additív technológiai paraméterek finomítása .....                                                                                | 29 |
| Próbatestek gyártása a forgácsolási vizsgálatokhoz .....                                                                         | 30 |
| Forgácsolási erők mérése.....                                                                                                    | 33 |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Erőmérés során meghatározott adatok kiértékelése .....                                                                                                                                                     | 34 |
| Kompenzációs szög meghatározása.....                                                                                                                                                                       | 34 |
| Egyszerűsített Kienzle-Victor modell alkalmazása .....                                                                                                                                                     | 37 |
| Bővített Kienzle-Victor modell alkalmazása .....                                                                                                                                                           | 39 |
| Erőmérés kiértékelése során kapott adatok értelmezése .....                                                                                                                                                | 40 |
| Felületi érdesség mérése és a forgácsolt felület elemzése .....                                                                                                                                            | 41 |
| Mikrokeményység mérése .....                                                                                                                                                                               | 49 |
| Konklúzió, összefoglalás .....                                                                                                                                                                             | 52 |
| Hivatkozások.....                                                                                                                                                                                          | 53 |
| Mellékletek .....                                                                                                                                                                                          | 55 |
| 1.sz. Melléklet: AISI H13-as melegalakító szerszámacél adatlapja .....                                                                                                                                     | 55 |
| 2.sz. Melléklet: vizsgálat során használt szerszám és lapka adatlapja.....                                                                                                                                 | 57 |
| 3.sz. Melléklet: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt<br>additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a hegesztőfej sebességét<br>változtatásával..... | 58 |
| 4.sz. Melléklet: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt<br>additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a lézersugár átmérőjének<br>változtatásával..... | 58 |
| 5.sz. Melléklet: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt<br>additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a rétegvastagság változtatásával                 |    |
| 59                                                                                                                                                                                                         |    |
| 6.sz. Melléklet: A pontos geometria meghatározását célzó próba gyártások során használt<br>additív technológiai paraméterek, lézersugár teljesítményét és a vonalköz változtatásával ....                  | 59 |
| 7.sz. Melléklet: Az első próba gyártások alapján módosított paraméterek.....                                                                                                                               | 60 |
| 8.sz. Melléklet: additív technológiával gyártott próbatestek méretei .....                                                                                                                                 | 60 |
| 9.sz. Melléklet: Forgácsolt felület felületiérddesség mérésének eredményei.....                                                                                                                            | 62 |
| 10.sz. Melléklet: Mikrokeményység mérés eredményei.....                                                                                                                                                    | 65 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 11.sz. Melléklet: Mikrokeménység mérés eredményei grafikusán ábrázolva .....               | 68 |
| 12.sz. Melléklet forgácsolt felületekről készített mikroszkópos felvételek .....           | 73 |
| 13.sz. Melléklet: Mért forgácsoló erő komponensek grafikonon ábrázolva .....               | 82 |
| 14.sz. Melléklet: A mért forgácsoló erők és az ismétlő mérések grafikonon ábrázolva .....  | 87 |
| 15.sz. Melléklet: A mért forgácsoló erők és a számolt forgácsoló erők grafikonon ábrázolva | 90 |
| 16.sz. Melléklet: Erőarányok grafikonon történő ábrázolása .....                           | 95 |
| 17.sz. Melléklet: Forgácsolási folyamatok – GY1 laborgyakorlat útmutató .....              | 99 |

## Absztrakt

Napjainkban egyre nagyobb az igény a költséghatékony gyártásra: a cél az adott darabszámot a lehető leghamarabb, minél kisebb veszteségek mellett elő állítani. Ezen igények kielégítésére kínálnak az additív és a hibrid gyártási technológiák egy kedvező megoldást: az additív módon gyártott előgyártmányok alkalmazásával nagymértékben lehet csökkenteni a későbbi forgácsolási folyamatok során keletkező anyagvesztést. Ezen technológiát kívánja meghonosítani a Csepeli Szerszámgépgyártó Kft. a saját gépparkjában egy egyedi tervezésű gyártó cella felépítésével. Ezen cella egy lézersugaras hegesztő berendezésből (mely képes additív gyártás megvalósítására), egy hat szabadsági fokkal rendelkező robot karból és ez öttengelyes megmunkáló központból tevődik össze. Jelen dolgozat célja egy prediktív jellegű vizsgálat megtervezése, összeállítása és végre hajtása melynek eredményei alapján következtetni lehet a vizsgálat anyag forgácsolási paramétereire. Elsőként meghatározásra kerültek az additív technológiai paraméterek, melyek alkalmazásával a rendelkezésre álló berendezésen geometriailag kielégítő pontosságú darabok gyárthatóak. Ezek után összeállításra, majd gyártásra kerültek azok a próbatestek melyeken a forgácsolhatóság szempontjából kulcs fontosságú erőméréseket hajtottuk végre. Az erőmérések során kapott adatokat a rendelkezésre álló programmal kiértékeltek, majd az eredményeket értékeltük. Ezen eredmények kulcsfontosságúak a cella sikeres üzemeltetéséhez, ugyanis a meghatározott eredmények kiindulásul szolgálnak a cella részét képező öttengelyes megmunkáló központ forgácsolási paramétereinek meghatározásban.

## Irodalom kutatás

### Forgácsolhatóság fogalma

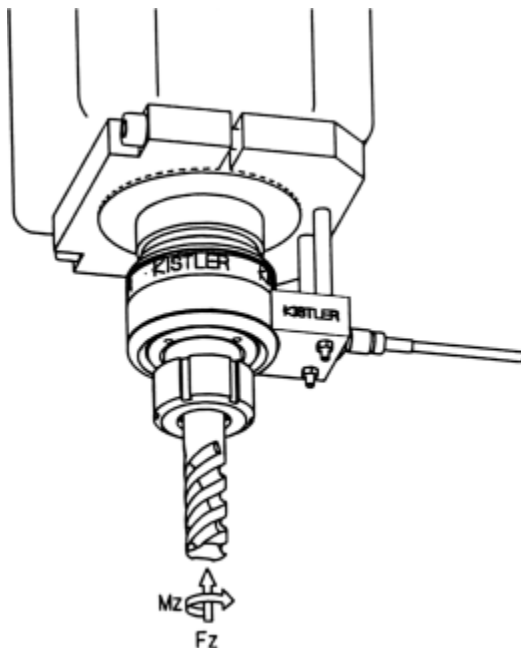
Első ránézésre a forgácsolhatóság fogalmát nehéz meghatározni. A forgácsolhatóság egy anyagtulajdonság, mely meghatározza, hogy azt adott anyagot mennyire lehet könnyen vagy nehezen adott anyagú forgácsoló szerszámmal megmunkálni. (1)

A forgácsolhatóság a mérnöki anyagok egy indikátora, mely megadja, hogy mennyire könnyű vagy nehéz az adott anyagot megmunkálni egy forgácsoló szerszámmal a kívánt felületi érdesség elérése mellett. A forgácsolhatóságot az anyagra jellemző paraméterek közé szokták sorolni. (2)

A forgácsolhatóság az az anyag tulajdonság mely megadja, hogy adott anyagot milyen könnyen lehet forgácsolni speciális energiában, speciális lóerőben vagy a nyírófeszültségben megadva. (3)

#### Forgácsoló erők mérése marásnál

Fúrásnál és marásnál a forgószerszám forgása miatt adód forgácsoló erőket a fellépő nyomaték mérésével lehet mérni. (4)



Ábra 1: Kistler által gyártott forgó - forgácsoló erőmérő dinamométer (4)

A fellépő  $M_z$  nyomaték meghatározása érdekében eltolható kvarclapokat helyeznek egymásra, amiknek az eltolási tengelyei radiálisan fekszenek. Az  $F_f$  előtoló erőt nyomókvarc alkalmazásával mérik. A marásnál a mérési tartomány függvényében alkalmazhatóak különböző 3-komponensű dinamométerek és az új fejlesztéseknek köszönhetően forgó forgácsolóerő mérő dinamométerek is. Ezek a forgó dinamométerek rotorból, statorból, összekötő kábelekből és jelszabályozóból állnak. A rotorba 2 komponensű piezo-elektromos szenzort, kettő darab jelerősítőt és digitális jel átvívó elektronikát építettek. Ezeket a dinamométerket nagysebességű forgácsolási méréseknél (marásnál és fúrásnál) használják, mint épp úgy a forgácsoló erők folyamatos monitorozására a kritikus szerszámoknál vagy drága forgácsolandó alkatrészeknél. (4)

### H13-as forgácsolhatósági vizsgálata a nemzetközi szakirodalomban

A AISI H13-as melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságát Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu vizsgálták (5) melyről 2010-ben publikáltak cikket. Kutatásukban a kísérleti módon vizsgálták a forgácsolási paramétereknek a forgácsolási erőre és felületi érdességre gyakorolt hatását, mindezt H13-as acél bevonattolt tömör keménységű szerszámmal történő keménymarása esetén. Három forgácsoló erő komponens és a forgácsolt felület érdessége volt mérve, utána a kapott adatokat a „range analysis and analysis of variance (ANOVA)” módszerével értékelték ki. (5)

A AISI H13-as szerszámacél nagyon jó hővel szembeni ellenállóképességgel és szívósággal rendelkezik éppen ezért széleskörű a felhasználása az iparban. Legfőképpen különböző szerszámok anyagaként használják a nyomásos öntészet esetén (itt az öntőforma anyaga), extrúzió esetén vagy kovácsolás esetén. Ebből a fajta acélból készült szerszámok alakításközben vízzel hűthetőek és nagy a hővel szembeni ellenállásuk és jó a kopás állóságuk. Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu a vizsgálataikhoz egy 150 mm hosszú, 100mm széles és 25mm magas H13-as acéltömböt használtak, mely  $50\pm 1$  HRC keménységűre volt edzve és megeresztve. (5) A névleges kémiai összetételét az általuk alkalmazott acélnek az alábbi táblázat mutatja.

| C         | Mn        | Si        | Cr        | Mo        | V         | Ni     | Fe   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|------|
| 0.32–0.45 | 0.20–0.50 | 0.80–1.20 | 4.75–5.50 | 1.10–1.75 | 0.80–1.20 | 0–0.30 | Bal. |

Táblázat 1: AISI H13-as melegalakító szerszámacél kémiai összetétele (5)

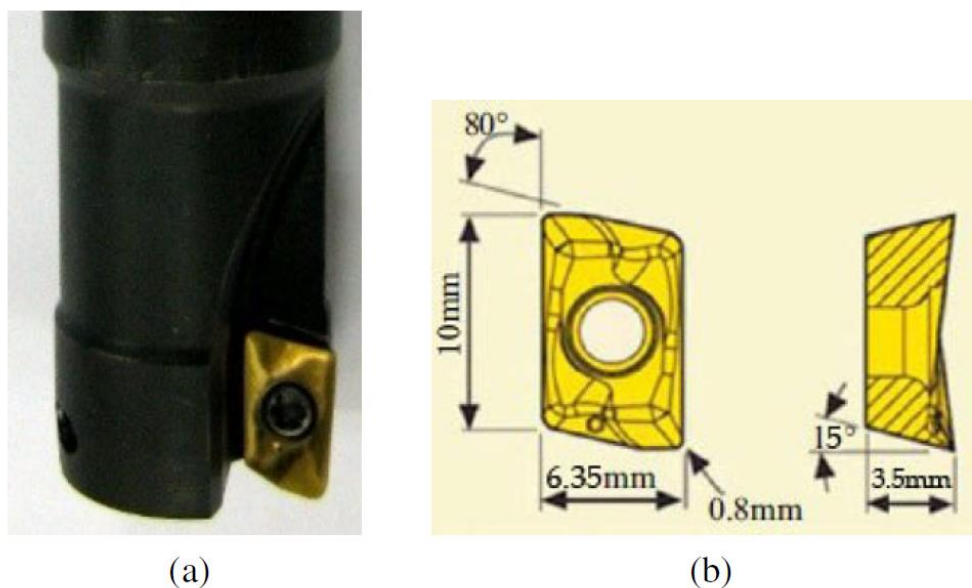
| Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Young's<br>modulus<br>(GPa) | Hardness<br>(HRC) | Yield<br>strength<br>(MPa) | Area<br>reduction<br>(%) | Thermal<br>conductivity<br>(W/mK) |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 7,800                           | 210                         | 50±1              | 1,579                      | 23.0                     | 25.6                              |

Táblázat 2: AISI H13-as melegalakító szerszámacél tulajdonságai

A forgácsolás során egy 20mm átmérőjű váltólapkás szármarót használtak, melyet a Seco Tool Company gyártott. Az alkalmazott szerszáma adatai a 3. Táblázatban találhatóak:

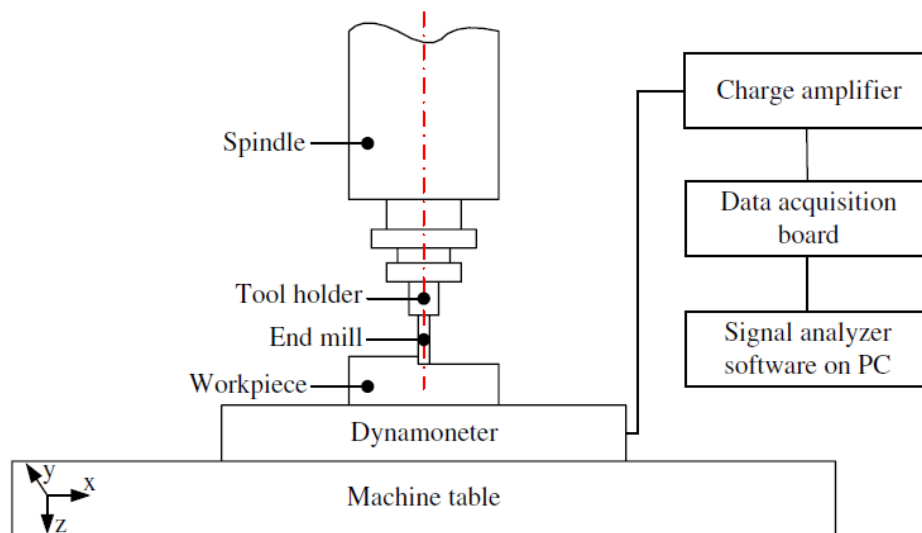
| Item                  | Description    |
|-----------------------|----------------|
| Tool holder           | R217.69-2020.0 |
| Tool diameter (mm)    | 20             |
| Overhang length (mm)  | 62             |
| Axial rake angle (°)  | 5              |
| Radial rake angle (°) | -10            |
| Insert designation    | XOMX 090308    |
| Insert clamping       | Collet         |
| Number of insert      | Single         |
| Coating material      | (Ti, Al)N-TiN  |
| Corner radius (mm)    | 0.8            |
| Insert thickness (mm) | 3.5            |
| Insert length (mm)    | 10             |
| Insert width (mm)     | 6.35           |

Táblázat 3: A (5) -cikkben használt maró szerszám adatai (5)



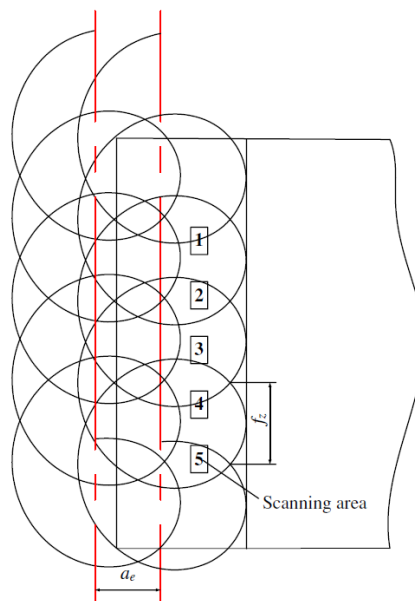
Ábra 2: Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu által a vizsgálataik során használt marószerszám test (a) és váltó lapka geometria (b) (5)

Minden egyes felület új, nem sérült szerszáméllal került megmunkálásra. Az összes marási művelet egy függőleges főorsójú CNC vezérlésű DAEWOO ACE-V500 típusú megmunkáló központban hűtő-kenő folyadék alkalmazása nélkül lett elvégezve. (5)



Ábra 3: Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu által használt mérési elrendezés leegyszerűsített ábrája

A 2. Ábra szemlélteti a Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu által használt mérési elrendezést. A (5) cikk szerzői a különböző erőkomponensek méréshez a szerszámgép asztalára egy Kistler típusú (Type 9257B) piezoelektromos dinamométert szereltek fel.



Ábra 4: Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu a vizsgálatuk során használt szerszám pályájának ábrája, szerepeltetve a vizsgált területeket.

A több csatornájú jelszűrő érzékenysége a normál erő esetén -7,939 pC/N-re, az előtoló erő esetén -7,960 pC/N-re míg az axiális erő esetén -3,722 pC/N-re volt állítva. Az adat gyűjtési frekvencia 7 Hz volt a (5) cikk szerzőinek a vizsgálata során. A kiértékelésnél a forgácsoló erő „hullámok”-

nak a stabil forgácsolás tartományában 10 csúcsa volt kiválasztva. Ennek a 10 csúcsnak az átlagát használták a további vizsgálatok során. (5)

A származás folyamata egy több pontú, megzavart forgácsolási folyamat, amiben a vágó él és a munkadarab kapcsolata nem folyamatos, és a még le nem választott forgács vastagsága a főorsó fordulatszám függvénye. Az egyenirányú marásnál a forgács vastagsága a szerszám egy fordulata alatt a maximumról a nullára csökken. Ebből kifolyólag a forgács vastagságának változása a szerszámra ható erő periodikus változását okozza a belépő és a kilépő él mentén. (5)

Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu kísérleti eredményei azt mutatták, hogy a normál erő negatív x-irányban a legdominánsabb a mért három erő közül és szignifikánsan nagyobb kilengéseket mutat, mint a másik két erő komponens az y- és z-irányokban. A korábban említett szerzők a vizsgálatuk során forgácsoló erő „hullámok” egy periódusának abszolút értékben vett legnagyobb értékét vették az adott irány forgácsoló erő komponensének. A mérések szerint a normál erő 241,4-1679,7N közötti, az előtoló erő 144,2-1435,4N közötti, az axiális erő pedig 73,4-818,5 N közötti értékeket vett fel. Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu méréseiből megállapítható, hogy az össze erő komponens alapján véve ugyan azt a változási trendet mutatta: a forgácsolási paraméterek értékeinek növelésével nő az erő komponensek nagysága is. (5)

A forgácsolás elvégzése után a (5) cikk szerzői az átlagos felületi érdességet ( $R_a$ ) mérték egy fehér fényt használó inteferométerrel (Veeco WYKO NT9300), a WYKOVision32-es szoftvert felhasználva függőleges szkennelési interferometria (angolul: „vertical scanning interferometry (VSI)”) módban 10-szeres nagyítás mellett. A függőleges szkennelési sebesség  $2 \mu\text{m/s}$  volt. A szkennelési terület  $640 \times 480 \mu\text{m}$  volt és minden egyes mérési felületen öt egymástól elkülönülő terület volt kiválasztva a szkennelésre. (5)

Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu a vizsgálatuk alapján megállapította a korábbi kutatásokkal összhangban, hogy forgácsoló erők és a felületi érdesség erő pozitív korrelációban vannak egymással. A nagyobb forgácsoló erő durvább felületet eredményez, mint a kisebb. A fent említett szerzők által végezett kísérleti feltételek a mellett az optimális forgácsolási paraméterek a legjobb felületi érdesség elérése érdekében az alábbiak voltak:  $v = 140 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ ,  $f_z = 0,08 \frac{\text{mm}}{\text{fog}}$ ,  $a_e = 1,5 \text{mm}$  és  $a_p = 2 \text{mm}$  (5)

Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang és Xiaoli Zhu idézett cikkének (5) a végén a soron következő konklúziókra jutottak. A legkiseb forgácsoló erők az alábbi paraméterekénél léptek fel:

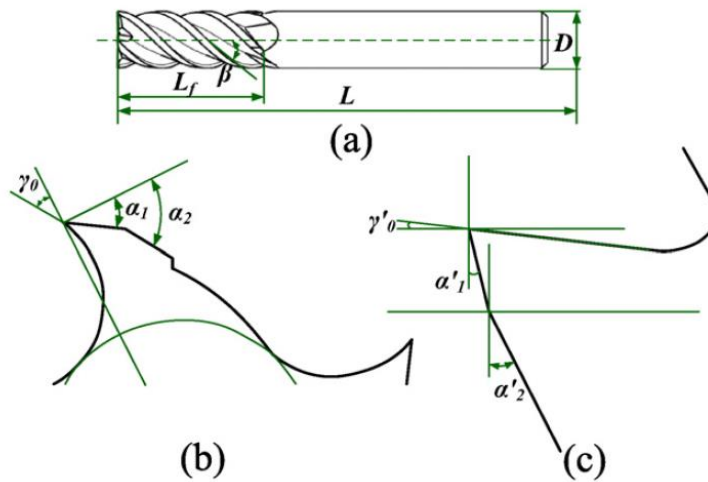
$v = 140 \frac{m}{min}$ ,  $f_z = 0,04 \frac{mm}{fog}$ ,  $a_e = 0,5mm$  és  $a_p = 1mm$ . Általánosságban megállapítható, hogy az axiális fogás mélység és az előtolás nagysága volt a két paraméter, amelyek a forgácsoló erőre a legnagyobb hatással bírtak. A normál erőre, az előtoló erőre, és az axiális erőre lineáris modellt lehetett illeszteni, míg a felületi érdességre négyzeteset. 0,25-ös Ra átlagos felületi érdességet lehetett elérni a legoptimálisabb paraméterekkel, ami jól bizonyítja, hogy a keménymarás a köszörülés egyik alternatívája. (5)

Bing Wang és Zhanqiang Liu (6) a tömör kerámia szármarókat vizsgálata AISI H13-as típusú melegalakítón szerszámacél megmunkálása esetén. A forgácsoló erőt mérték horony marás közben, figyelték a szerszám élek kopását, és a szerszám élettartalmát a végén pedig a megmunkált felület felületi érdességét mérték. Négy féle tömör kerámia szármarót használtak a vizsgálataik során: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> alapú kerámia marót, Ti(C,N) alapú cermet marót, és kettő általánosan elérhető Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alapú kerámia marót. Ezen utóbbi kettő azonosítója: SG4 és LT55, ezen két szerszám csak kémiai összetételében térnek el egymástól. Összehasonlítás képen a vizsgálatot ugyanazokkal a paraméterekkel egy tömörkeménymaróval is megismételték. (6)

| Tool code                      | Main tool material                      | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Elasticity modulus (GPa) | Hardness (HV) | Bending strength (MPa) | Fracture toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> ) |
|--------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>          | 3.26                         | 310                      | 1740          | 950                    | 7.54                                       |
| Ti(C,N)                        | Ti(C,N)                                 | 6.40                         | 400                      | 1650          | 2050                   | 8.5                                        |
| SG4                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(W,Ti)C | 6.65                         | 453                      | 2117          | 850                    | 4.94                                       |
| LT55                           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiC     | 4.96                         | 420                      | 2085          | 900                    | 5.04                                       |
| Carbide                        | Cemented carbide                        | 11.9                         | 534                      | 1260          | 1500                   | 9.5                                        |

Táblázat 4: Wang és Liu által a vizsgálataikhoz használt szármarók fizikai és mechanikai tulajdonságai (6)

A munkadarab a tanulmányban (6) egy AISI H13-as edzett acél darab volt, mely 60-62HRC-re volt felezve, geometriáját tekintve 100mm x 100mm x 5mm méretű volt. A forgácsolahtósági vizsgálatot egy SMTCL VMC0540d típusú CNC vezérlésű szerszámgépen végezték el. A forgácsolási paraméterek tanulmányukban rendre állandóak voltak: 100 m/min-es forgácsolási sebesség; 0,05 mm/fog -as előtolás és 0,5mm-es fogási mélység. A vizsgálat közben, adott periódusonként a szár kopása volt mérve egy optikai mikroszkóp segítségével. A szerszám élettartamát pedig rögzítették, ha a kopás mértéke elérte vagy meghaladta a 0,03 mm-et.



Ábra 5: Wang és Liu által alkalmazott szerszámok és azok élgeometriájának ábrája (6)

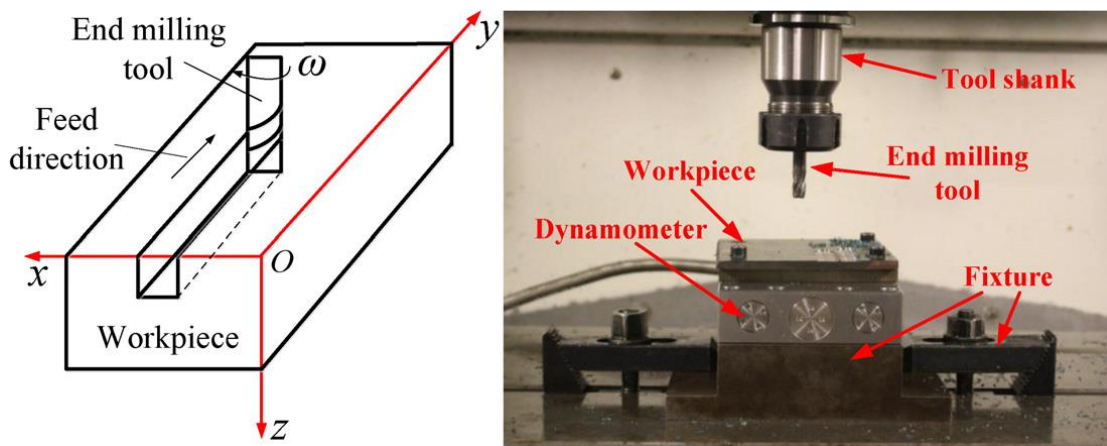
| Length of tool<br>$L$ (mm) | Length of flutes<br>$L_f$ (mm) | Side edge rake<br>angle $\gamma_0$ (°) | First relief angle on<br>side edge $\alpha_1$ (°) | Second relief angle on<br>side edge $\alpha_2$ (°) | End edge rake<br>angle $\gamma'_0$ (°) | First relief angle on<br>end edge $\alpha'_1$ (°) | Second relief angle on<br>end edge $\alpha'_2$ (°) |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 60                         | 20                             | 10                                     | 9                                                 | 25                                                 | 0                                      | 10                                                | 30                                                 |

Táblázat 5: Wang és Liu által használt marók geometriája (6)

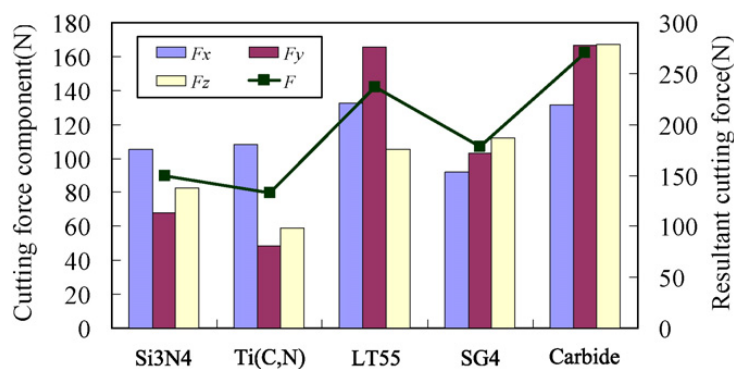
Minden mérést a fent felsorolt paraméterekkel háromszor ismételték meg. A forgácsoló erőket egy Kistler piezoelektromos dinamométerrel rögzítették, melyet a szerszámgép asztalára szereltek fel. A mérés után a megmunkált felületet és a szerszám kopását mikroszkóp alatt vizsgálták.



Kép 1: Wang és Liu által a vizsgálatukhoz használt szerszámok képe



Ábra 6: Wang és Liu mérési elrendezésének schematikus ábrája (balra) és a tényleges mérési elrendezés (jobbra) (6)



Ábra 7: Wang és Liu által mért erők a H 3-as acél marása közben (6)

Wang és Liu vizsgálatai során megállapította, hogy a Si3Ni4, Ti(C,N), és az LT55-ös tömör kerámia maróval megmunkált felületen ritkán találhatók sérülések, kivéve természetesen az előtolás okozta jellegzetes mintázat. Ez a tipikus mintázat legkevésbé a Ti(C,N) maró által megmunkált felületen vehető ki és ezzel a maróval sikerült a legjobb felületi érdességet elérni: az  $R_a$  itt  $0,390 \mu\text{m}$  volt. A felületi érdesség ( $R_a$ ) a Si3Ni4-el és a Lt55-el simított felületeken rendre:  $0,409 \mu\text{m}$  és  $0,489 \mu\text{m}$  voltak. Összehasonlítás képen a tömörkeményfém maróval és a SG4-el megmunkált felületeken egyértelmű sérülések láthatóak. Ez azzal magyarázható, hogy ennél a két szerszámnál sokkal nagyobb volt az axiális forgácsoló erő többi szerszámmal képest, ami nagyobb deformációhoz vezetett a megmunkált anyagban.

Wang és Liu a vizsgálatukból a soron következő megállapításokat szűrték le. A forgácsoló erők a kerámia marókkal történő megmunkálás esetén jelentősen kisebbek, mint a tömör keményfém maró esetében. A Ti(C,N) marónál például fele akkorák voltak a forgácsoló erők mint a tömör keményfém esetében. Ez is jól példázza, hogy a Ti(C,N)-ből készült marók mekkora potenciállal rendelkeznek, különösen, ha vékony felű munkadarabot kell megmunkálni. A forgácsolt felület

minősége, érdessége a Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>-nél, a Ti(C,N)-nél és a LT55-nél lényegében megegyeztek és jóval nagyobb mértékben jobb minőségűek voltak, mint a SG4 vagy a tömör keménységű maró alkalmazása esetén. A feljebb felsorolt első három maró szerszámnak jelentősen nagyobb volt az élettartama is az adott körülmények között, mint a Sg4 vagy a tömörkeménységű maró. A kerámia Ti(C,N) maróval történő forgácsolás adta a legjobb felületi minőséget, közben mérték a legkisebb forgácsoló erőket és a szerszám élettartama is jelentősen nagy volt. A kerámia forgácsoló szerszámokat széles körben lehetne alkalmazni, ha a hajlítási szilárdságukat és a szívósságukat együttesen lehetne növelni. A kerámiából készült marókat jó eredményekkel lehet edzett acélokhoz használni, az adott acélokra jellemző magas keménység és alacsony kémiai reaktivitás mellett. (6)

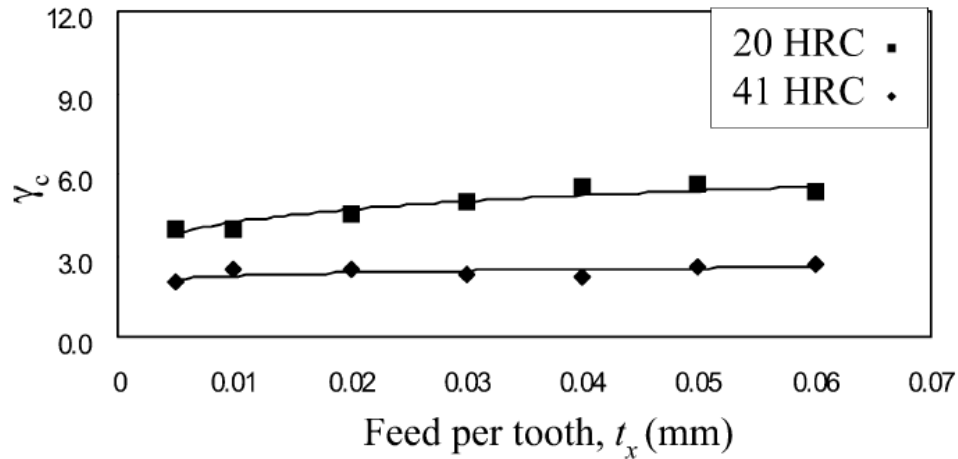
J.J.Junz Wang és M.Y. Zheng a AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságát vizsgálta, melynek során két féle keménységi állapotú – 20HRC és 41 HRC acélt munkáltak meg gömbvégű maróval. (7)

A vizsgálataik során Wang és Zheng egy tömör keménységű gömb marót használtak R4-es lekerekítési sugárral, melynek egy darab forgácsoló éle volt. A szerszám vágó éle, TiAlNi-al volt bevonatolva. A forgácsolt anyag AISI H13-as melegalakító szerszámacél volt; két különböző hőkezelésű H13-as acélt forgácsoltak, melyeknek a keménysége rendre 20 HRC és 41 HRC volt, az elsőnek a szakítószilárdsága 700 MPa körül mozgott, míg az utóbbinak 1400 MPa körül. A vizsgálat során alkalmazott forgácsolási paramétereket az alábbi táblázat mutatja (7):

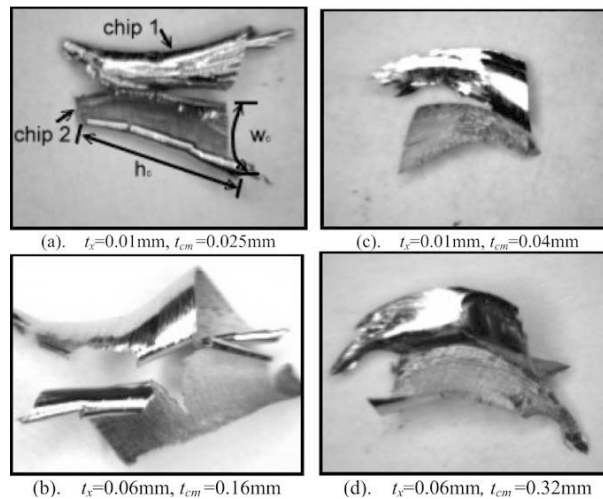
| Workpiece                | Feed/tooth<br>$f_x$ (mm)                  | Cutting velocity<br>$V_c$ (m/min) | Axial depth $d_a$ (mm) |
|--------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| H13 at 41 HRC and 20 HRC | 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 | 60                                | 4                      |

*Táblázat 6: Wang és Zheng által a gömbvégű maróval H13-as acélon végzett forgácsolási vizsgálataik során használt technológiai paraméterek (7)*

Wang és Zheng a vizsgálatok során keletkezett forgácsot gyűjtötte és további méréseknek vetette alá, illetve összehasonlította a két különböző keménységű acél forgácsait. Megállapították, hogy a forgács térfogata az alakváltozott és az alakváltozás előtti anyagban közel azonos az anyag keménységétől függetlenül. A deformáció mértéke alapján az puhább acélra kellett volna rövidebb és vékonyabb forgácsot adnia, de az eredményül kapott vastag forgácsok ennek ellentmondanak. A forgács alakját tekintve a puhább acél esetében „folyamatos” (szalag alakú) típusba tartozott ahogy az várható volt, míg a nagyobb keménységgel rendelkező acél forgácsolása során keletkezett a várttal ellentétben is ebbe a forgács típusba tartozott. Ennek a magyarázata, hogy a 40-41HRC keménység az a határ, ami alatt még nem alakulnak ki töredezett forgács darabok. (7)



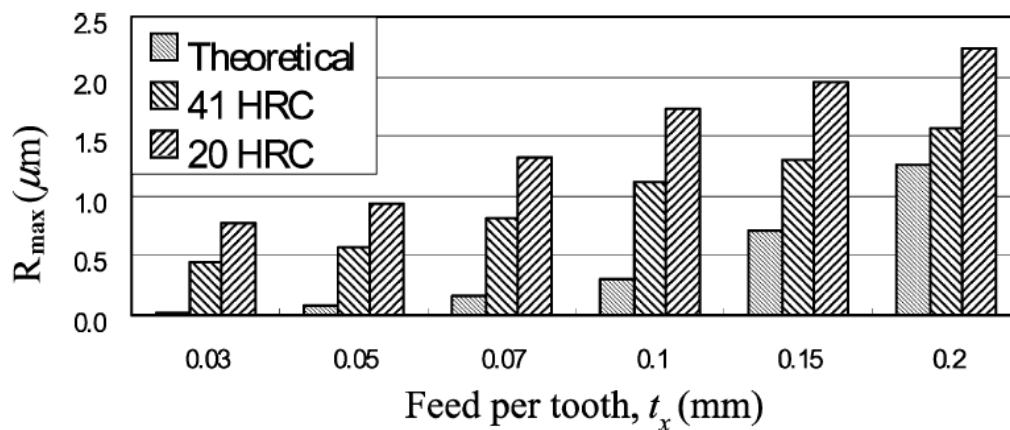
Ábra 8: Forgács kompressziós tényező a fogankénti előtolás függvényében 20HRC és 41HRC keménységű szerszámacél esetében (7)



Kép 2: Forgács alak és maximum forgács vastagság ( $t_{cm}$ )  $t_x=0,01\text{mm}$ -as és  $t_x=0,06\text{mm}$ -es fogankénti előtolás esetében H13-as szerszám acél marása esetén 41 HRC keménységi állapotban (a,b) és 20HRC keménységi állapotban (c,d) (7)

A felületi érdességet Whang és Zheng az előtolási irányában a félkör alakú mintázat legtetetjén. A forgácsolási sebességtől függetlenül a nagyobb keménységgel rendelkező anyag a megmunkálás után jobb felületi minőséggel rendelkezett, mint a kisebb keménységű. A kisebb keménységgel rendelkező acél esetében a felületi minőség alacsony kis forgácsolási sebesség esetén, azonban javul a forgácsolási sebesség értékének növelésével. Ez a megfigyelés megegyezik az általános vélekedéssel, miszerint duktilis anyagok forgácsolása esetén a felületi minőség a forgácsolási sebesség értékének növelésével javul ugyanis az instabil élrátétképződés kialakulásának mértéke csökken. A nagyobb keménységgel rendelkező acél esetében a jobb felületi minőség az élrátétképződés hiányával magyarázható. A nagyobb keménységű acél forgácsolása esetében a

sokkal kisebb forgácsolási energia alapján a szerszám él körül a plasztikus deformáció mértéke is jelentősen kisebb az anyagban, ami tovább segíti a jobb felületi érdesség elérését. (7)



Ábra 9: Az elméleti és a mért felületi érdesség összehasonlítása a 20 HRC és a 41 HRC keménységű acél forgácsolása után, 60 m/min-es forgácsoló sebességgel és változó előtolással

Wang és Zheng a vizsgálataik végén az alábbi megállapításokra jutott: a forgácsoláshoz/vágáshoz szükséges energia (ploughing energy) a kisebb keménységű acél forgácsolása esetén kisebb volt. A méret nagysága (size effect) csak kismértékben játszik szerepet a nyírás mechanizmusában. Arányaiban tekintve a forgácsoláshoz/vágáshoz szükséges energia (ploughing energy) jóval nagyobb, mint a nyíráshoz szükséges energia. Ezt a különbséget a behatolási folyamatban meghatározóbb szerepet játszó duktilitással és keménységgel lehet magyarázni. A nagyobb duktilitás miatt a kisebb keménységű acél forgácsolása során keletkezett forgácsok sokkal nagyobb mértékben voltak deformálódva és a vastagságuk is a kétszerese a nagyobb keménységű acél megmunkálása során keletkezett forgácsokéhoz képest. A megmunkálás után keletkezett felület minősége nagyságrendekkel jobb volt, mint a kisebb keménységű anyag megmunkálása esetében. Ezen utóbbi anyag forgácsolása során az előállított felület minősége nagy mértékben javítható a forgácsolási sebesség növelésével. Ennek a magyarázata az élrátétképződése a kis forgácsolási sebesség esetén a duktilis anyagban. (6)

Lizzula, Sorgato és társaik 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. (8) Vizsgálataim során C45-ös acél felületére gyártottak több rétegű AISI szerinti H13-as anyagú darabokat. Vizsgálataikhoz egy 3kW-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. 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. (8)

| 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 |

Táblázat 7: Lizzul, Sorgato és társai által a vizsgálataik során alkalmazott AISI H13-as acél kémiai összetétele (8)

| Parameter             | Value(s)                                    |
|-----------------------|---------------------------------------------|
| Powder size range (G) | 50–100 $\mu\text{m}$ /100–150 $\mu\text{m}$ |
| 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                                           |

Táblázat 8: Lizzul, Sorgato és társaik által alkalmazott additív technológiai paraméterek (8)

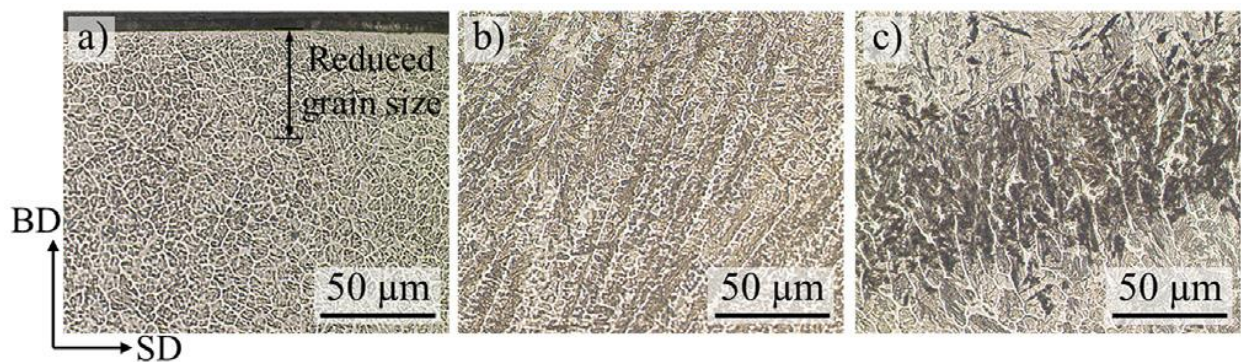
A különböző rétegszámú próbatestek forgácsolhatósági vizsgálatát egy nagysebességű CNC vezérlésű marógépen végezték el, száraz megmunkálással a melegalakító szerszámok ipari gyártási hagyományainak megfelelően. A marást egymással párhuzamos vonalak mentén végezték el, mely vonalak a felrakás irányára merőlegesek voltak. A forgácsolási paraméterek az alkalmazott szerszámok gyártói ajánlásai alapján választották meg, melyek rendre a következők voltak: nagyoló marást egy 16mm átmérőjű, 3mm-es éllekerekítésű toroid maróval végeztek el – a megfelelő síkfelület elő állítása érdekében – 0,15 mm-es fogásmélységgel, 100 m/min-es forgácsolási sebességgel, 0,2mm/ford. –os előtolással. A nagyolást követte a simító marás, melyet egy 6mm-es átmérőjű, két élű PVD bevonatolt, keményfém gömb végű maróval végeztek 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 minta darab esetében 6 darab mérést hajtottak végre melyekből később a normál és előtolási erő komponenseket határozták meg. (8)

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 mikroszkópikus képek szoftveres kiértékelésével határozták meg az adott darab porozitását. A mikrokeménységet 200 gf-es terheléssel Lietz Durimet mikrokeménység mérő 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. (8)

Minden vizsgált minta magas fokú anizotrópiát mutatott. Nagy mértékű eltérések jellemezték a makró szerkezetet a mintáknak, függetlenül azok irányultságától. A rétegvastagág a lézersugár pásztázási sebességének növelésével csökkent, ezzel szemben a lézersugár teljesítményének növelése ellentétes hatás váltott ki, azonban kisebb mértékben. Nagyobb pásztázási sebesség mellett a lézersugár által a folyamatba bevitt energia mennyisége csökken, ezért a megolvadt fémpont mértke is csökken, vagyis a keletkező réteg vastagsága kisebb lesz. A por átlagos szemcse méretének 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 rétegvastagságának változásában trendet figyeltek meg: az alaplaptól távolodva az egyes rétegek vastagsága fokozatosan növekedett. Az időben legkésőbb felvitt réteg 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. (8)

A longitudinális és transzverzális minták metallográfiai vizsgálata során több különböző mikroszerkezetet tudtak megkülönböztetni. Ez alól kivételt képez az időben utolsóként felvitt réteg melyben szépen elkülönülő poligonális szerű szemcsék jöttek létre. Mélyebben fekvő rétegek összességében kétfajta szemcse szerkezetet tartalmaztak egymással keveredve: denrides poligoniális szerű – melyen szemcsék száma főleg egy réteg szélén domináns – és poliginiális szerű – melyfőleg 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 közötti különböző hőmérséklet gradiens és megszilárdulás során jelentkező eltérő megszilárdulási sebesség miatt. Igazából az ömledékben a dendrides szerkezet magashőmérséklet gradiens esetében a hőmérséklet fluxus vektorral ellentétesen növekszik, az ömledék poliginiális szemcse szerkezettel fog megszilárdulni. Az időben legkésőbb felrakott réteg esetében az ömledék gyors megszilárdulásra volt képes a környezetével folytatott magas mértékű hőcsere miatt. Ezért a poligoniális szemcse szerkezet 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. (8)



Kép 3: Lézersugar bevonatolással gyártott próbatestekről készített mikroszkópos képek, melyeken a szövetszerkezet látható (8)

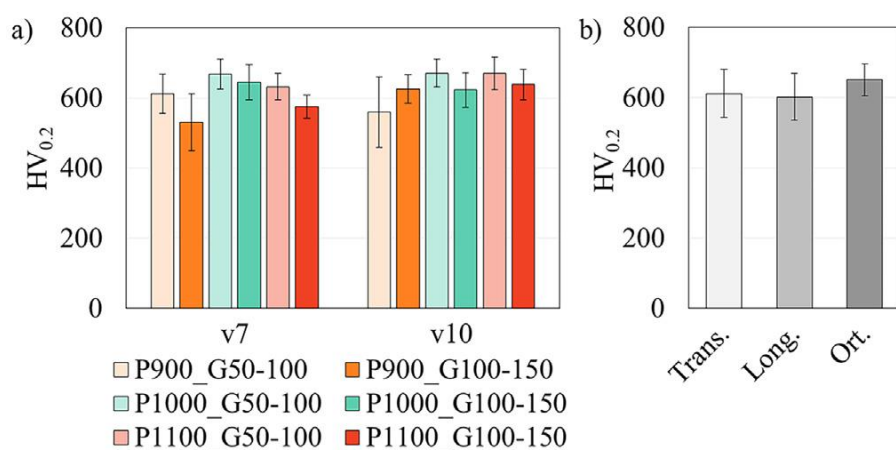
A pórusok többsége (kerek pórusok) a rétegek külső szélein helyezkedtek el. A pásztázási sebesség csökkentésével mind a pórusok mérete mind a pórusok száma jelentősen csökkent. A lézersugár teljesítménynek változtatása nem gyakorolt szignifikáns hatást a pórusok számára vagy méretére, azonban a legmagasabb használt lézersugár teljesítmény alacsony pásztázási sebességgel párosítva jelentősen csökkentette a pórusok számát. (8)

A bevonatolás során felvitt anyag mikrokeménysége növekedett, ha a pásztázási sebességet is növelték. Korlátozott növekedést figyeltek meg a felvitt anyag mikró keménységében közepes lézersugár teljesítmény mellett. Azonban elmondható, hogy a bevonatolás technológiai paraméterienek nincsen szignifikáns, jelentős mértékű hatása a gyártott anyag mikrokeménységére. (8)

Általánosságban megállapították (8), 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. (8)

Az alacsony rétegszám jobb bevonatolási minőséget eredményezett – kisebb mértékű porozitás és anyagszerkezettani hibák és magasabb mikrokeménység-, azonban nehezebb forgácsolhatóságot – a forgácsoási erők megnövekedtek és a felület minősége romlott. (8)

A mintadarabok mikrokeménységének inhomogenitása a gyártott anyagban kialakuló magas keménységgel rendelkező sávok kialakulásával magyarázható. Ez vezetett a forgácsolt felület inhomogenitásához. (8)



Ábra 10: A bevonatolás átlagos mikrokeménysége a különböző technológiai paraméterek esetén (a) és a különböző irányból kimunált metalográfiai minták átlagos mikrokeménysége (8)

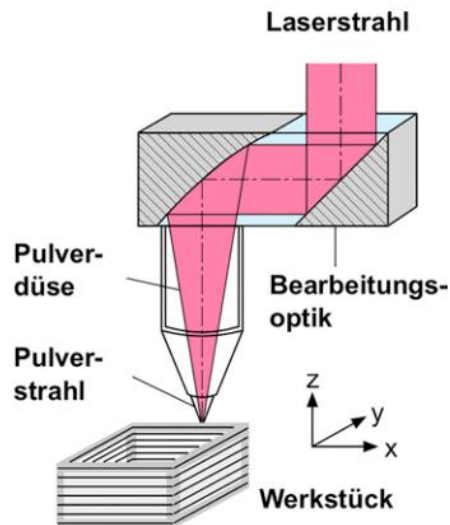
| Cladding | Sa (μm)     | Sku (–)     | Ssk (–)     | Spk (μm)    | Svk (μm)    | Sdr (%)     |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2 layers | 1.88 ± 0.05 | 4.43 ± 0.35 | 1.11 ± 0.06 | 4.14 ± 0.03 | 0.76 ± 0.05 | 3.54 ± 0.10 |
| 3 layers | 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 |

Táblázat 9: Lizzul, Sorgato és társaik által mért különböző felületi érdességek (8)

## Lézersugaras hegesztő berendezés bemutatása

### Alkalmazott additív gyártási technológia bemutatása

Az általunk alkalmazott eljárást, ami a port egy fúvófejen keresztül közvetlenül a lézer sugár által létrehozott olvadékba juttatja, és így a kívánt anyagot létre hozza, Lézeres Generálásnak vagy porárammal történő lézeres bevonatolásnak is lehet nevezni. (9)



Ábra 11: Koaxiális kialakítású por felvitel (9)

Az alkalmazott technológiánál a por felvitele szabadon programozható speciális kialakítású fejjel történik – lásd Ábra 2. -, ami úgy van kialakítva, hogy a felvitt anyagot lézersugár segítségével rögtön megolvasztja. Az anyag megszilárdulásával létre jön egy újabb réteg, a keletkezett hő pedig a már meglévő munkadarabon keresztül kerül elvezetésre. (9)

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 egymásra és mellé fektetésével jön létre. (9)

„A lézersugaras additív gyártás eljárásváltozatokban a lézersugár fókuszoltjába 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 nyomtatás, ami lehetőséget kínál a felület tulajdonságainak folyamatos megváltoztatására.” (10)

## 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 karbantartás mentesen üzemeltethető. A gép hatékonysága többek között a rendkívül stabil lézernyalábnak is köszönhető, még 50  $\mu\text{m}$  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.” (11)



Ábra 12: LRS EVO Diodeline típusú lézersugaras hegesztő berendezés (11)



Kép 4: LRS EVO Diodeline hegesztő berendezés üzemeltetés közben

„Az új lézerfej kialakításnak köszönhetően különböző, más-más fókusztávolságú lencsék alkalmazási is lehetséges. A fókusztávolság minden egyes lencsében elektronikusan 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 szerszámgyártásban, 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.” (11)

## Kísérleti terv

### Additív technológiai paraméterek meghatározása

Összeségében az alábbi paramétereket kell 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
- A stratégia, ami szerint az anyagot fekteti le a berendezés

Mivel csak korlátozott számban állnak rendelkezésre források, ezért ezeket a paramétereket tapasztalati úton voltam kénytelenek meghatározni, célom azon paraméter együttes megállapítása volt, melyekkel az általam elvárt geometriai pontosság elérhető. A geometriát kielégítőnek ítélem ha a méretei az előírt méretek egy megfelelő tűrésmezővel túllépik, így a jövőben végzendő forgácsolási műveleteknek biztosan megfelelő mértékű ráhagyás lesz. Meg kell jegyeznem, hogy ezzel a technológiával durva felületi minőség érhető el, így például egy szerszám javítása során vagy egy tengely bevonatolása kor minden féleképpen szükséges az 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 cég vezetésének felület előkészítést is mint önálló lépés beilleszteni a műveleti láncba. A vizsgálataim során AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél fémport – adatlapját csatolom az 1.sz. Mellékletben - vittem fel S235JR alaplapra.

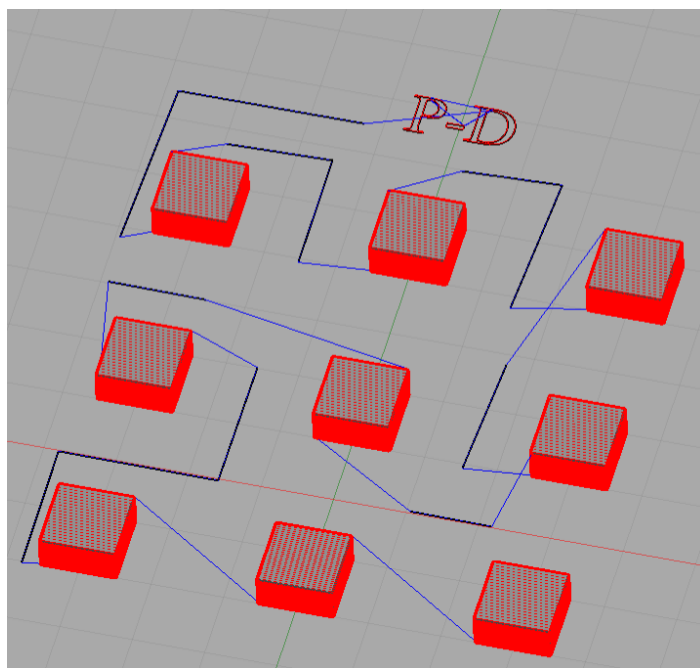
Az egyes próbadarab megkülönböztetésének az érdekében bevezetek egy kód rendszert, mely a vizsgált paraméterek angol nevének első betűiből a paraméter csomag „sorszámából” és a vizsgálatához használt anyag nevéből tevődik össze, például: PV-1-H13.

10mm x 10mm x 5mm-es vagy 10mm x 10mm x 3mm-es téglatestek lesznek legyártva. A gyártás során a mindig két adott technológiai paramétert változtatok 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 – egyrétegen két vonal közötti osztás nagysága (Kód: PLD-\_\_ -H13 vagy PV-\_\_ -15-5PH) – Ezen utolsó vizsgálati csoportot eredetileg nem terveztem, azonban a AISI H13-as melegalakító szerszámacél nehéz feldolgozhatósága miatt szükséges volt, ugyanis a fellebb említett paraméter csoportokkal nem sikerült elérni az elvárt 5mm-es magasságot. Ennél a paraméter csoportnál a cél a 3mm-es magasság elérése volt gazdaságossági okok miatt.

Egy paraméter csoportban, amiben rendre két paraméter változtatok paraméterenként 3 darabot alkalmazok. Tehát egy paraméter csoport összesen 9 paraméter kombinációt tartalmaz. Mivel első körben 4 darab paraméter csoport kerül kinyomtatásra, így összesen 36 darab próba téglát kerül előállításra. Ezen paraméter „együtteseket” csatolom a 3.sz. – 6.sz. Mellékletben. Ezen próba téglák testel kinyomtatása és a megfelelő mérések elvégzése után fogok tudni következtetni az additív technológiai paraméterek további változtatására. A paraméter táblázatomat a Wigner Jenő kutatóintézetben a berendezéssel korábban végzett próba gyártások alapján állítottam össze.



Ábra 13: Próba gyártás CAM környezetben

Ezek után elkészítettem a próba testek CAD modelljét. A CAD modellt a géphez tartozó Orlas Suite CAM programba behívva, a megfelelő technológiai paraméterek megadásával elkészítettem a gyártáshoz szükséges CAM programot.

## Forgácsoló erő mérés

A forgácsoló erő mérését egy váltólapkás, 16mm átmérőjű,  $r=0,4\text{mm}$  -es éllekerkítésű SECO által gyártott egyélű szármároval terveztem elvégezni. 3 darab fogankénti előtolási értéket terveztem alkalmazni ezek rendre: 0,04 mm/ford; 0,08 mm/ford; 0,16 mm/ford. A forgácsolás során 3db forgácsolási sebesség értéket terveztem alkalmazni. A gyártó által a lapkához ajánlott forgácsolási sebesség 170 m/min, ha melegalakító (edzett) szerszámacél kerül megmunkálásra az adott lapkával. A lapka állagának megóvása érdekében ezt az értéket nem akartam túllépni, így a 170 m/min-et elosztottam 3 fele, így a forgácsolási sebesség rendre a következők: 43 m/min; 85 m/min és 170 m/min. 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 kell 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  $\Delta\varphi$  szöginkrementum határozza meg (azaz a szerszám minden egyes  $\Delta\varphi$  szögelfordulását követően történik mintavételezés), ami legyen:” (12)

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

„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:

- $f_m \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$ : mintavételezési frekvencia
- $n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$ : fordulatszám

A forgácsolás során 40 darabra terveztem a mintavételezett fordulatok számát. A fogásmélység  $a_p=1,5\text{mm}$  -re terveztem, míg a fogás szélességet  $a_e=5\text{mm}$ -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 próba testen egy előtolással 3db forgácsolási sebességgel fogunk dolgozni, ezért 3 darab fogás kell majd venni. A darab magasságára még ráhagyást kellett hagyni a síkolás céljából és ráhagytam még 2mm-t, hogy el tudjam kerülni az alaplap esetleges nem kívánt megmunkálását. Így végül  $3 \cdot 1,5\text{mm} + 2\text{mm} +$

3,5mm = 10 mm magas kellett, hogy legyenek a próbatestek. A próba testek hosszát az alábbi képlettel határoztam meg:

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

Ahol:

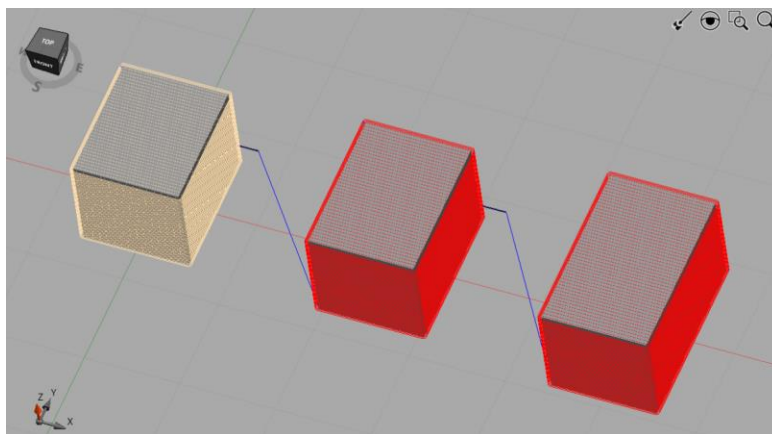
- $L[\text{mm}]$  a próbatestek hossza
- $f_z[\text{mm/ford}]$  a fogankénti előtolás
- $\Delta L=3[\text{mm}]$ : Rá- és lefutási ráhagyás. A forgácsolás során a mérést már a forgácsolás megkezdése után terveztem indítani és a mért adatokat a rendelkezésre álló programmal utólag kiértékelni. Ezért a rá- és lefutási ráhagyást értékét csökkenteni tudtam, ami az próbatestek additív gyártást 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:

| Fogankénti előtolás $f_z$ [mm] | Próbatest hossza $L[\text{mm}]$ | Próbatest szélessége [mm] | Próbatest magassága [mm] |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,04                           | 13                              | 11                        | 10                       |
| 0,08                           | 15                              | 11                        | 10                       |
| 0,16                           | 18                              | 11                        | 10                       |

Táblázat 10: Próbatestek geometriai méretei az előtolás függvényében

A mérés során szerszámgép asztalára egy Kistler által gyártott 3-komponensű piezoelektromos dinamometere kerül felszerelésre, mellyel a forgácsoló erőt tervezem mérni.



Ábra 14: Próbatestek elrendezése a CAM programban

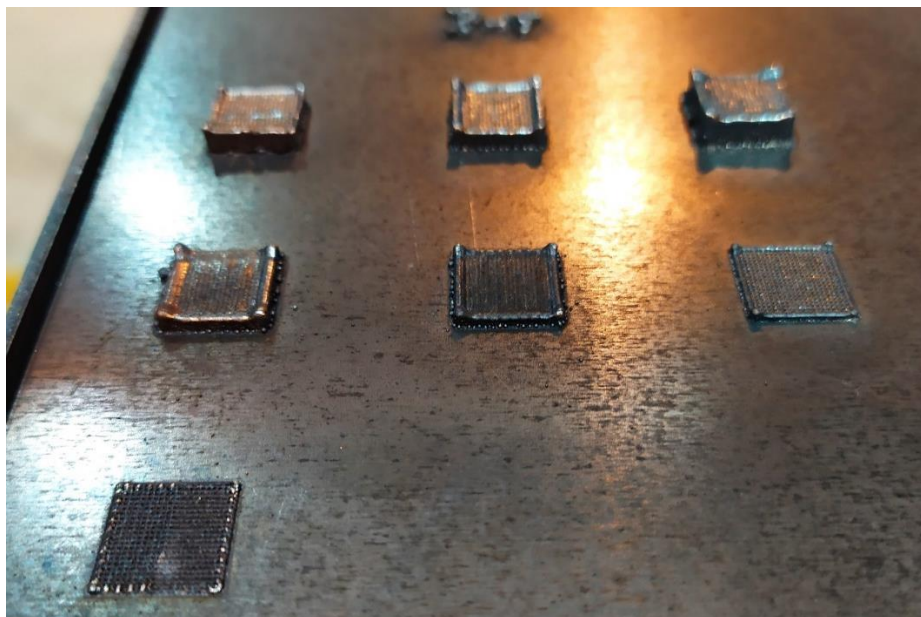
## Előkészület a forgácsolhatósági vizsgálatokhoz

Additív technológiai paraméterek meghatározása, melyek a geometriailag kielégítő pontosságú gyártást teszik lehetővé

A kísérleti tervnek megfelelően legyártottam az első mintadarabokat, első lépésként szemre vételeztem a próbatesteket, majd a méreteiket egy Mitutoyo 503-101 tolómérővel mértem le.

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

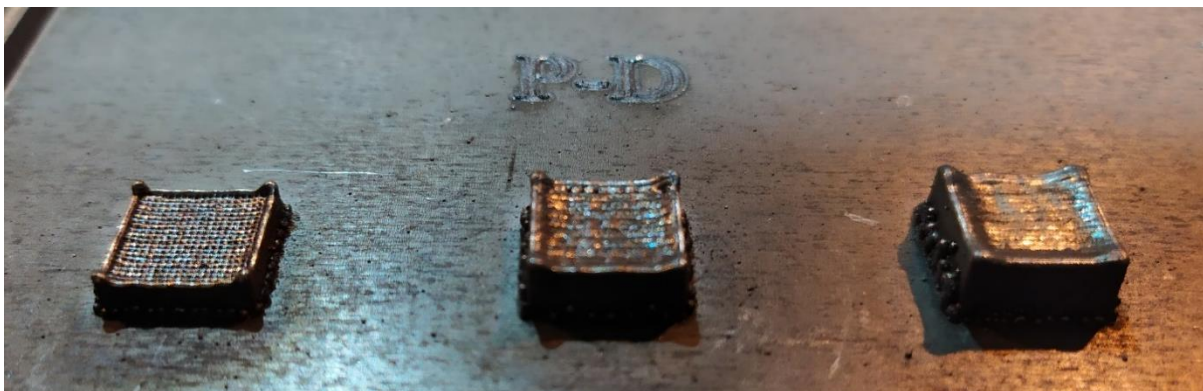
Ennél a kísérletnél a korábbi tapasztalatok és a szakirodalom alapján a lézer sugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50%; 65%; 80% volt, míg a hegesztőfej asztalhoz képesti relatív sebessége rendre 5 mm/s; 10mm/s; 15mm/s; volt. Szemre vételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága 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 fémpornak a 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 túllépi az előírt magasságot.



Kép 5: H13 szerszámacél próbatestek melyek a lézersugár teljesítményének és a pásztázási sebesség változtatásával készülnek

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

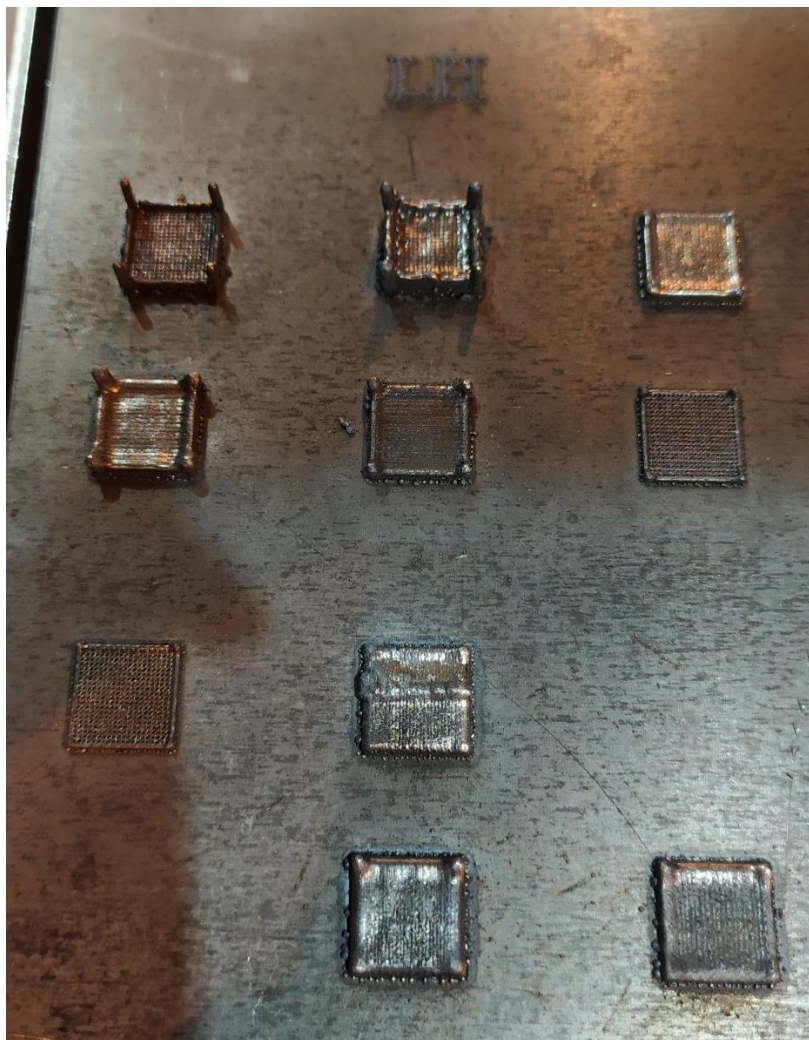
Ennél a lézer sugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50%; 65%; 80% volt, míg a lézersugár átmérője a fókuszpontban rendre 0,74mm; 1,24mm; 1,5mm volt. Szemre vételezés alapján megállapítottam, hogy az darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a lézersugár átmérőjének a csökkentésével 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.



*Kép 6: H13 szerszámacél próbatetek melyek a lézersugár teljesítményének és a lézersugár átmérőjének változtatásával készülnek*

Lézersugár teljesítménye – Nyomtatási réteg vastagsága H13-as anyagnál additív technológia alkalmazásánál

Ennél a vizsgálatnál lézer sugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 50%; 65%; 80% volt, míg az egyes rétegek vastagsága rendre 100 $\mu$ m; 200  $\mu$ m; 400  $\mu$ m volt. Szemre vételezés alapján megállapítottam, hogy a darab magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a rétegvastagság csökkentésével nő. Adott pásztázási sebesség mellett a réteg vastagság csökkentésével a nyomtatási 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.



*Kép 7: H13 szerszámacél próbatestek melyek a lézersugár teljesítményének és réteg vastagság változtatásával készülnek*

Lézersugár teljesítménye – egyrétegen két vonal közötti osztás 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 ált a rendelkezésemre, így gazdaságosáig okokból a téglatestek magasságát 3mm-re csökkentettem. Ezekkel a mintadarabokkal egyszerre vizsgáltam az additív gyártás és a bevonatolás paramétereit is. Ennél a vizsgálatnál lézer sugár teljesítménye a maximálishoz képest rendre 60%; 75%; 90% volt, míg az A vonal egymáshoz képesti átfedése rendre 40%; 50%; 60% volt. Szemre vételezés alapján megállapítottam, hogy az anyag magassága a lézersugár teljesítményének növelésével és a vonal átfedésének a növelésével nő. A magasság ezzel a megoldással nagy mértékben növelhető,

azonban a gyártási idő is megnövekszik. Túlzottan nagy átfedés esetén a darab magassága jelentősen meghaladja az előírtat gyakran több milliméterrel is.



Kép 8: Próba darabok melyek a lézersugár teljesítményének és a lépésköz változtatásával készültek H13-as acélból

#### Additív technológiai paraméterek finomítása

Az első körös próba gyártások után, megállapítottam, hogy a téglatestek három befoglaló mérete közül a névleges magasságot a legnehezebb elérni. Összeségében 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 paraméter táblázatot az 7.sz. Mellékletben csatolom. Meglepődve kellett tapasztalnom, hogy ugyan abból az anyagból, ugyan azon a berendezésen, ugyan arra az alaplagra végzet gyártás esetén a magasságban lényeges 1 mm-es csökkenés lépett fel. Ez jól látható az 8. Képen, 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 megnöveltem és ezzel a paraméter csomaggal kezdetem a forgácsolási kísérlet tervnek megfelelő első próba test kinyomtatását.

| Teljesítmény<br>P[%] | Teljesítmény<br>P[W] | Sebesség<br>v[mm/s] | Spot<br>Size<br>[mm] | Rétegvastagság<br>[um] | Vonal<br>vastagság<br>[mm] | Overlap [%] | Hatch<br>distance<br>[mm] |
|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|
| 80%                  | 360                  | 5                   | 0,74                 | 200                    | 0,74                       | 50%         | 0,37                      |

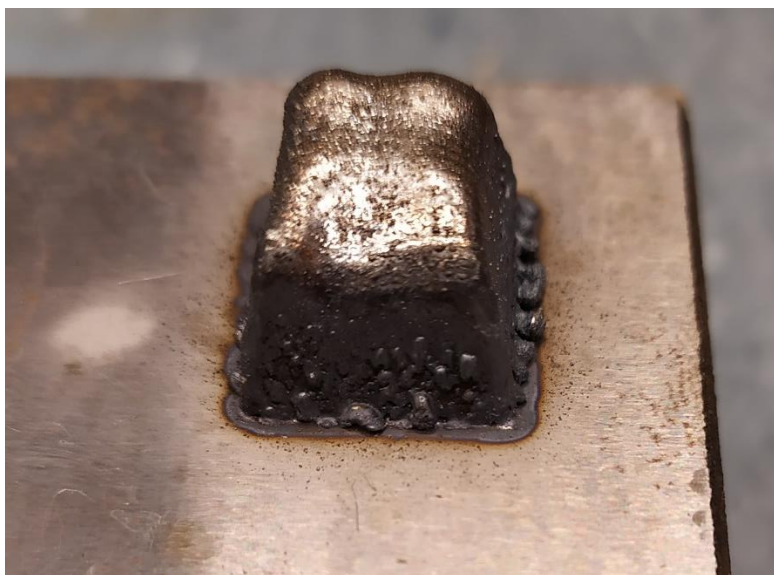
Táblázat 11: Forgácsolhatósági vizsgálatokhoz gyártott próbatestek additív technológiai paraméterei

Ezt a jelenséget én a berendezés nem megfelelő üzemi körülményeivel magyarázom. A csarnokban, ahol a berendezés üzemelteti a Csepeli Szerszámgépgyártó Kft. nem tartható fenn

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

#### Próbatestek gyártása a forgácsolási vizsgálatokhoz

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



Kép 9: Első előállított próba test

A 6. Képen 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.

| Teljesítmény<br>P[%] | Teljesítmény<br>P[W] | Sebesség<br>v[mm/s] | Spot<br>Size<br>[mm] | Rétegvastagság<br>[um] | Vonal<br>vastagság<br>[mm] | Overlap [%] | Hatch<br>distance<br>[mm] |
|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|
| 85%                  | 382,5                | 5                   | 0,74                 | 200                    | 0,74                       | 60%         | 0,444                     |

Táblázat 12: A gyakorlati tapasztalatok alapján módosított additív technológiai paraméterek

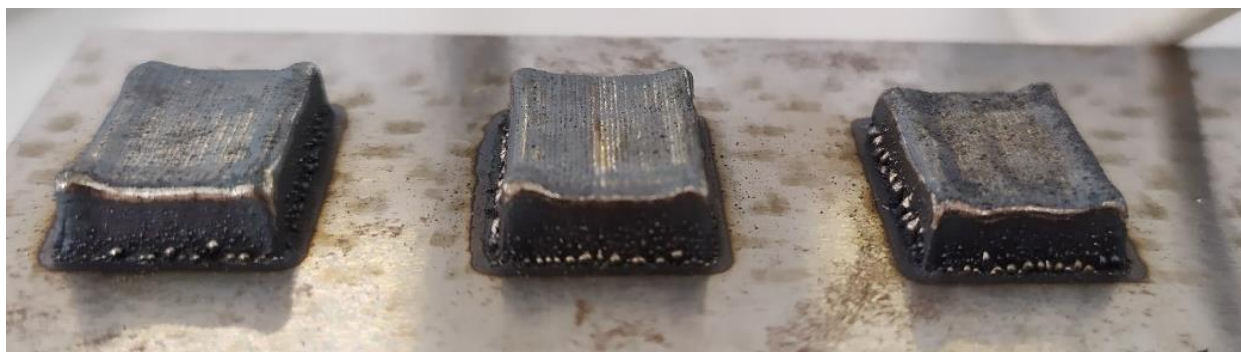
A próba testek magasságát 5 mm-re csökkentettem. A szükséges számú próba forgácsolás elvégezhető legyen egy adott méretű próbatestből 3 db került legyártásra. Ezek alakja és méretei már rendre kielégítőek voltak. Ezek a próbatestek láthatóak az alábbi képeken.



*Kép 10: Balról jobbra rendre az "1/1"-es; "1/2"-es és "1/3"-as jelű próbatestek*



*Kép 11: Balról jobbra rendre az "2/1"-es; "2/2"-es és "2/3"-as jelű próbatestek*



*Kép 12: Balról jobbra rendre az "3/1"-es; "3/2"-es és "3/3"-as jelű próbatestek*

A 10-12. képen 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 5mm, két olyan próbatest is volt ahol a legnagyobb mért magasság sem érte el az előírt 5 mm-t. Ez szerencsére nem jelentett problémát, ugyanis próbatest rendelkezett megfelelő mennyiségű technológiai ráhagyással, hogy a forgácsolahtósági vizsgálatokat el lehessen rajta végezni.

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

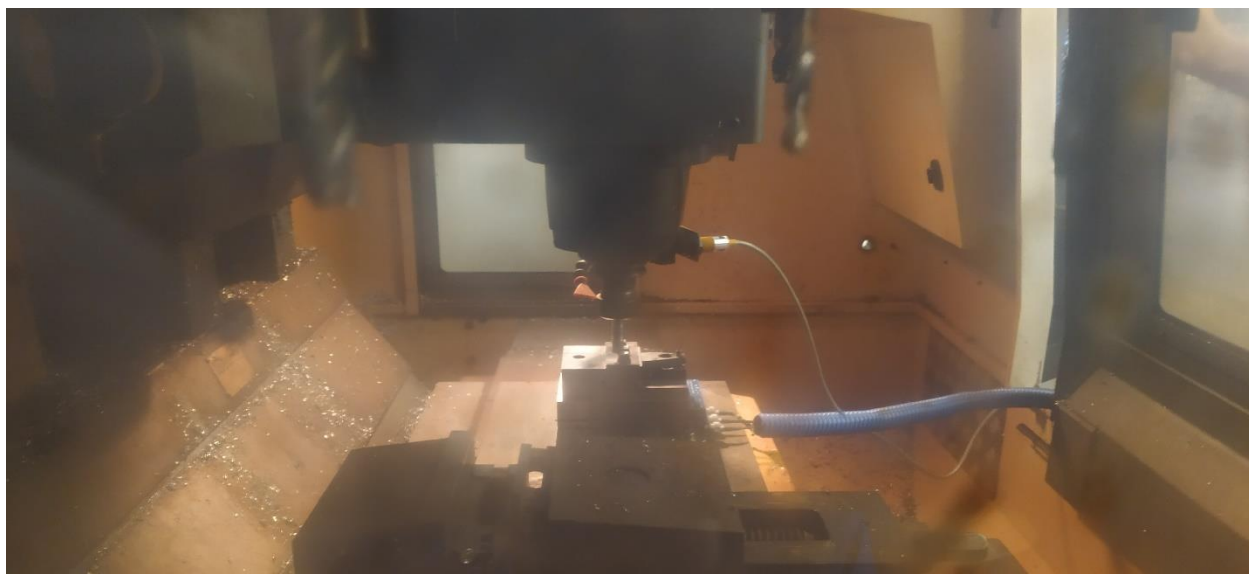
| Próbatest kódja | Fogankénti előtolás $f_z$ [mm] | Forgácsoló sebesség $v_c$ [m/min] | Főorsó fordulatszáma $n$ [1/min] | Mintavételezési frekvencia $f_m$ [1/min] |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| 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                                  |

Táblázat 13: A mérések során használt technológiai paraméterek

## Forgácsolási erők mérése

A forgácsolási erők mérése 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 jelenlét-érzékelő, 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.



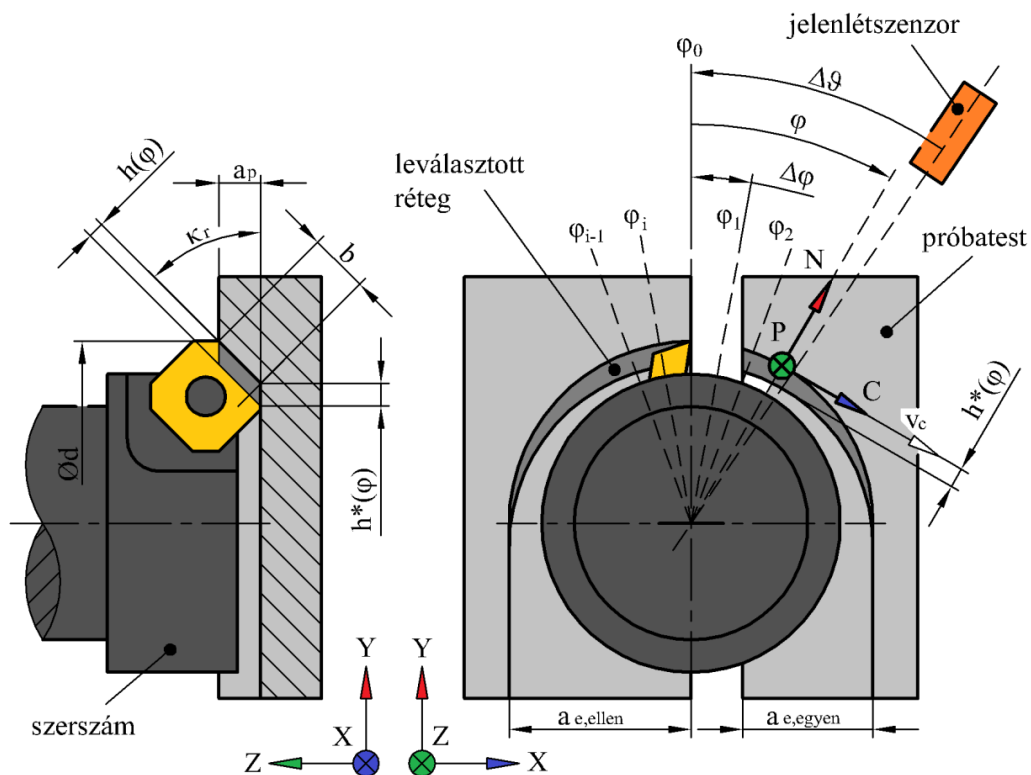
*Kép 13: Forgácsoló erők mérése Kondia 640B megmunkáló központon*

## Erőmérés során meghatározott adatok kiértékelése

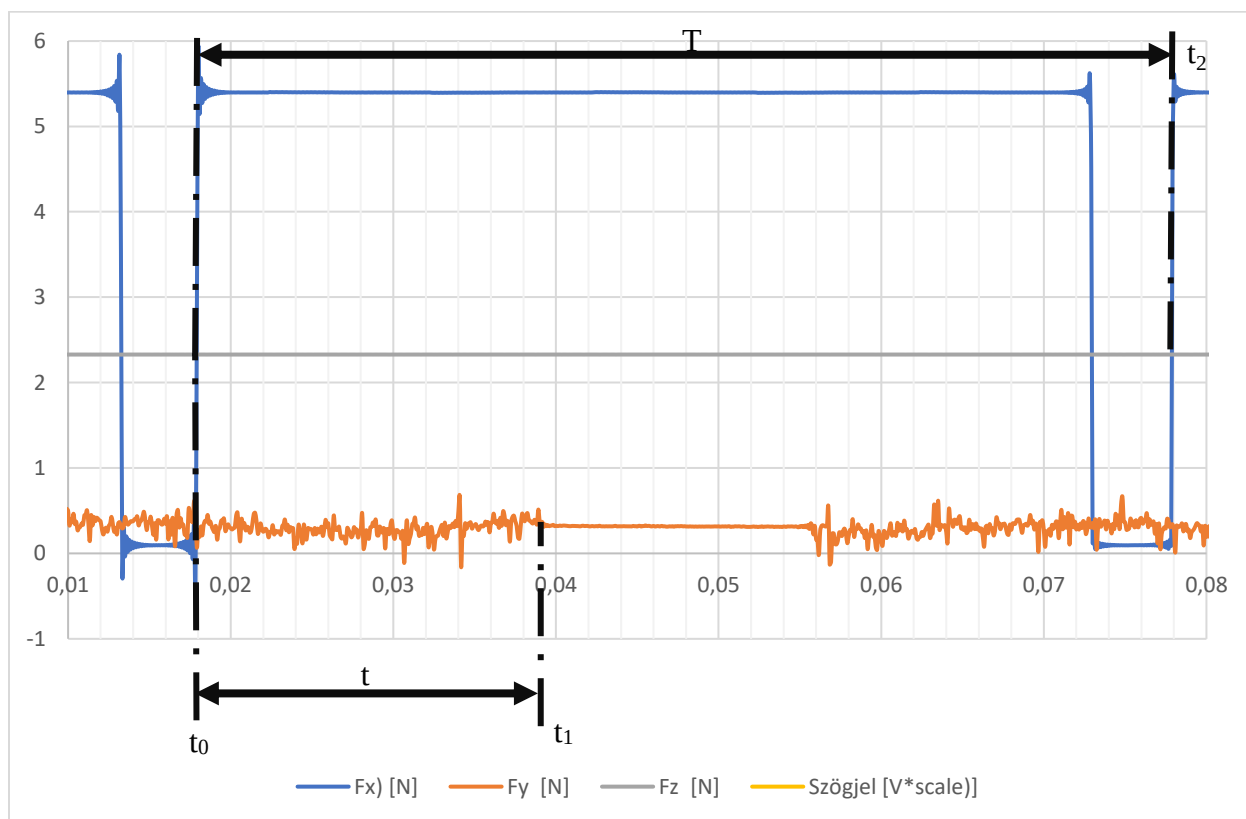
A mért adatok kiértékelését a „mg01-GY1\_Maras-kiertekeles\_program.exe” kiértékelő programmal végeztem el, mely programot dr. Biró István egyetemi adjunktus úr készített a Forgácsolási folyamatok című tantárgy GY1 laborgyakorlatára. A laborgyakorlat sillabuszát az 17.sz. mellékletben csatolom. (12) A mért adatok kiértékelését ezen dokumentum lépési szerint a „mg01-GY1\_Maras-kiertekeles\_program.exe” programmal és saját készítésű excel táblával készített el, melyet a variancia vizsgálat -ANOVA: Analysis of Variance - során használtam. Eslőként az egyszerűsített Kienzle-Victor modelt alkalmaztam minden mérésre, mérésenként külön-külön. Majd a bővítt Kienzle-Victor modellt alkalmaztam a korábban említett laborsillabusz (12) 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 méréseként ábrázoló grafikonokat a 13.sz. 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 normál erő – az idő függvényében grafikonon ábrázoltam és az így kapott grafikonokat a 14.sz. Mellékletben csatoltam.

### Kompenzációs szög meghatározása

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



Ábra 15: A Forgácsolási folyamatok Gy1-es laborgyakorlatán alkalmazott mérés mérési összeállítás vázlata, paraméterei (12)



Grafikon 1: 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 át halad a kompenzációs szögen.

Azonban én 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:

$$\Delta\vartheta = \pi - \left( \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t_1 - t_0) \right) \quad (1)$$

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.

| Sorszám | t0 [s] | t1[s] | t2[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 |

Táblázat 14: Kalibrációs mérési adatokból meghatározott időpillanatok és kompenzációs szögek

A 10. Táblázat adatai alapján a Kompenzációs szög átlaga  $52^\circ$ . A későbbiekben a „mg01-GY1\_Maras-kierkeles\_program.exe” programban ezt az értéket használtam.

## Egyszerűsített Kienzle-Victor modell alkalmazása

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

$$F_{c,a} = k_{c1} \cdot h^{x_{F,a}} \cdot b^{y_{F,b}} \quad (3)$$

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-kiértékelés\_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 befejezéskor mikor, a szerszám kilép az anyagból az erő értékekben nagy mértékű ugrás figyelhető meg. (Lásd. 13.sz. Melléklet - 1. Mérés). A mért adatok értelmezhetőségének és más adatokkal való összehasonlításának az érdekében ezt az „ugrás” tartományát 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 számítását ebben az esetben is a Forgácsolási folyamatok című tantárgy GY1-es laborsillabuszának (12) 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:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{\alpha}} = \underline{\underline{a}} \quad (4)$$

Ahol:

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

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  $b [mm]$ : forgács szélesség
- $K = \lg k_{c1}$ ; 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.

$$\underline{\underline{A^{-1} \cdot a = a}} \quad (6)$$

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

| 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 |

Táblázat 15: Egyenirányú marások során meghatározott fajlagos forgácsolóerő értéke

| 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 |

Táblázat 16: Ellenirányú marások esetében meghatározott fajlagos forgácsoló erő értékek

Ellenirányú marás esetében a fajlagos forgácsoló erő átlaga  $3035 N/mm^2$  volt 2400-as szórással. Ez nagymértékű szórás, melyet a 15. Táblázatban található értékeket megfigyelve megállapítható, hogy az első mérési adatokból számolt fajlagos forgácsoló erő adja. Ezen mérés adataiból meghatározott fajlagos forgácsolóerő nélkül az átlag  $2263 N/mm^2$  668-as szórással.

A 15. és 16. táblázatból jól látható, hogy az egyenirányú marás esetében a kapott fajlagos forgácsolóerő értékek nagyságrenddel kisebbek. Átlaguk  $606 N/mm^2$  115-ös szórással.

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

$$F_{c,számolt,i} = k_{c1} \cdot h_i^{x_{F,a}} \cdot b^{y_{F,b}} \quad (7)$$

Ahol:

- $F_{c,számolt,i} [N]$ : Forgácsoló erő
- $k_{c1} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ : 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 „visszaszámol” forgácsolóerőket adott mérés során mért és figyelembe vett forgácsolóerőkkel együtt az idő függvényében ábrázoltam. Az így kapott grafikonokat a 15.sz. Mellékletben csatolom. Általánosságban megállapítható, hogy a grafikonon a mért és számolt forgácsolóerők 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.” (12) Éppen ezért meghatároztam mérésenként az arányszámokat a GY1 laborgyakorlat sillabuszának megfelelően majd ábrázoltam őket az idő függvényében. Az így eredményül kapott grafikonokat a 16.sz. Mellékletben csatolom.

#### Bővített Kienzle-Victor modell alkalmazása

A bővített Kienzle-Victor modellt a GY1 laborgyakorlat segédlete (12) szerint alkalmazta lépésről lépésre. A számítások mente, az egyes kifejezések közti összefüggések a korábban említett dokumentumban megtalálhatóak. 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.” (12) 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.

## Erőmérés kiértékelése során kapott adatok értelmezése

A számított fajlagos forgácsoló erők alapján megállapítható, hogy egyenirányú marás esetében a kapott értékek mind az S235JR  $k_{c1.6} = 1312 \frac{N}{mm^2}$ -es (13) értékénél, mind a C45  $k_{c1.6} = 2028 \frac{N}{mm^2}$ -as (4) értékénél. Ellenirányú marás esetében a legtöbb esetben a kapott fajlagos forgácsoló erők meghaladják a C45  $k_{c1.6} = 2028 \frac{N}{mm^2}$ -as (4) értékét, azonban a 9.; 11; 13. és 15. Mérés esetében A C45 fajlagos forgácsoló erejét nem, míg az S235JR  $k_{c1.6} = 1312 \frac{N}{mm^2}$ -es (13) értékét meghaladják. A 11.; 13. és 15. Mérés során kapott fajlagos forgácsoló erők a C45E  $k_{c1.6} = 1569 \frac{N}{mm^2}$ -es (13) érte körül mozognak.

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.

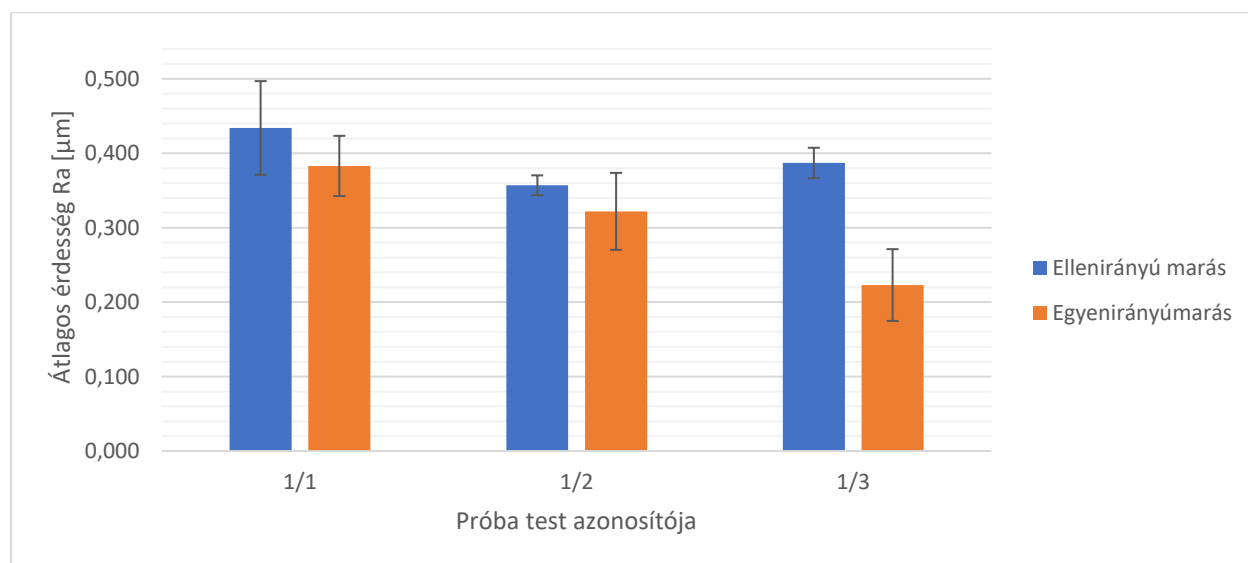
A mérés adatok kiértékelése alapján megállapítható, hogy ellen irányú marás esetében miután a forgácsolás folyamata stabilizálódott A főforgácsoló erő mértéke mindig meghaladta a normál erő mértékét.

10 és 18 mérésnél rezgés lépett fel ez jól megfigyelhető a 13. sz. Mellékletben csatolt grafikonokon.

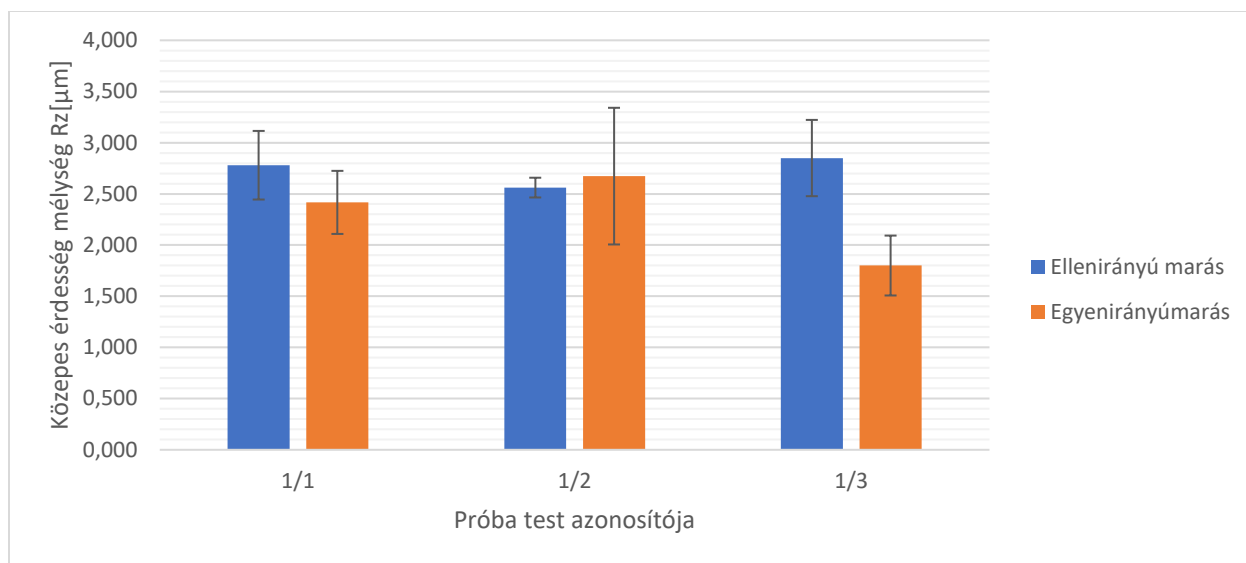
Az ismételt mérésekből generált forgácsoló erők grafikonjait összevetve – lásd. 14. sz. Melléklet – általános következtetést nem tudtam leszűrni. A legtöbb esetben az ismétlődő mérések során nagyobb forgácsoló erőkre volt szükség. Azonban a 9. és a 10. Mérés ismétlése során meghatározott forgácsolóerők egy nagyságrendbe estek az eredeti mérés során meghatározott erőkkel.

## Felületi érdesség mérése és a forgácsolt felület elemzése

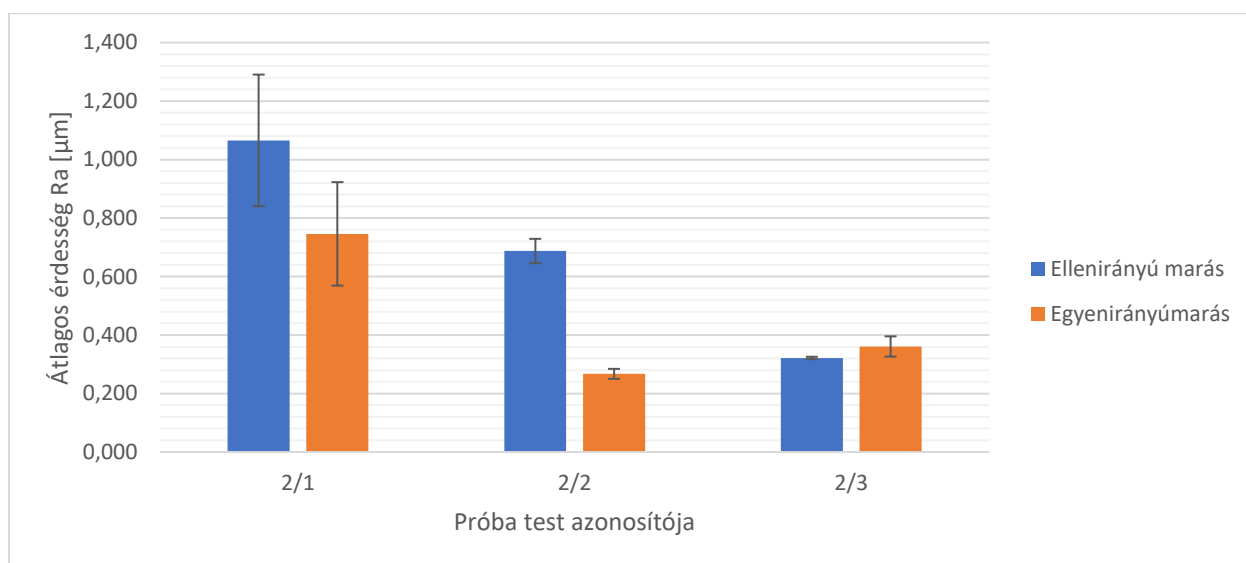
A forgácsolt felületi felületi érdességének a mérését egy Mitutoyo Surftest SJ-401 Típusú metszet tapintóval végeztem el. Egy adott forgácsolt felületet háromszor tapogattam le, az előtolás irányában, a metszet tapintó által mért értékeket – a metszet tapintó Átlagos felületi érdeséget (Ra) és Közepes érdesség mélységet (Rz) mért - pedig excel táblába jegyeztem fel. Az így kapott mérési adatokat a 8. sz. Mellékletben csatoltam. Mindegyik forgácsolt felületet egy egyedi azonosítóval láttam el a későbbi megkülönböztetés céljából: „Próbatest alaplajának 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 9. sz. Mellékletben csatolom. A kapott eredményeket oszlop grafikonon is ábrázoltam:



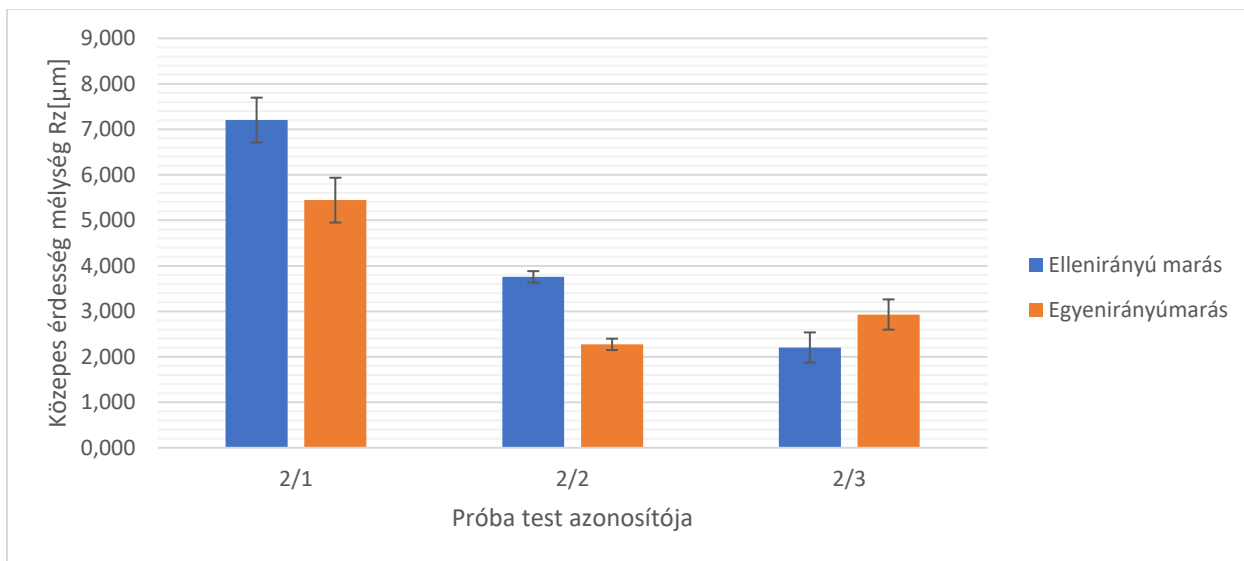
Grafikon 2: "1"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



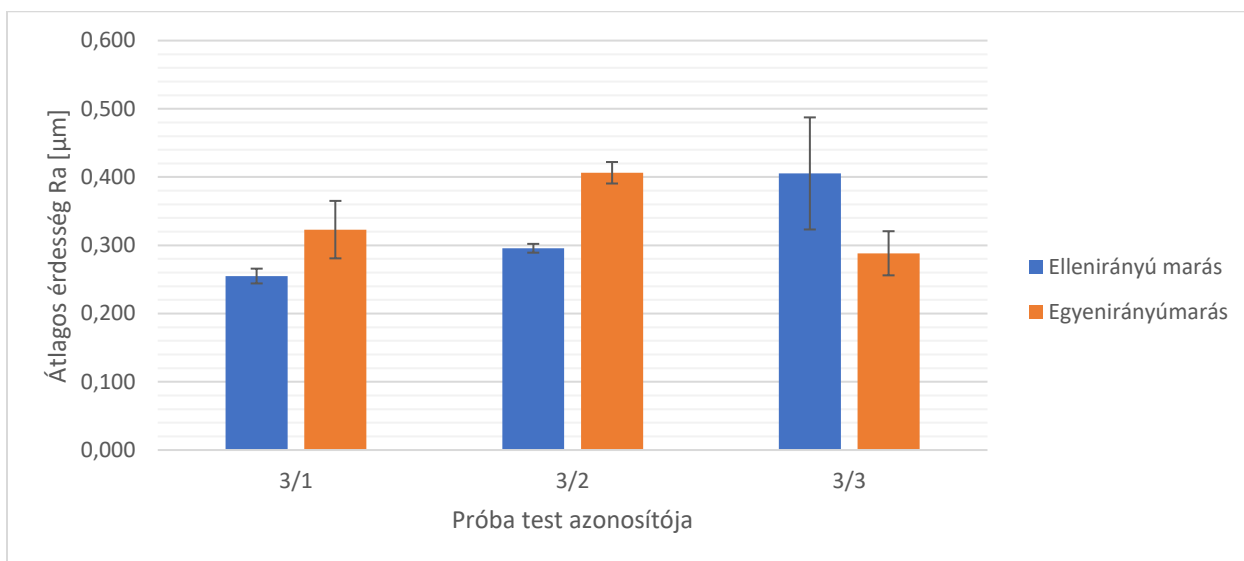
Grafikon 3: "1"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért közepes érdesség mélységek (Rz) [ $\mu\text{m}$ ] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



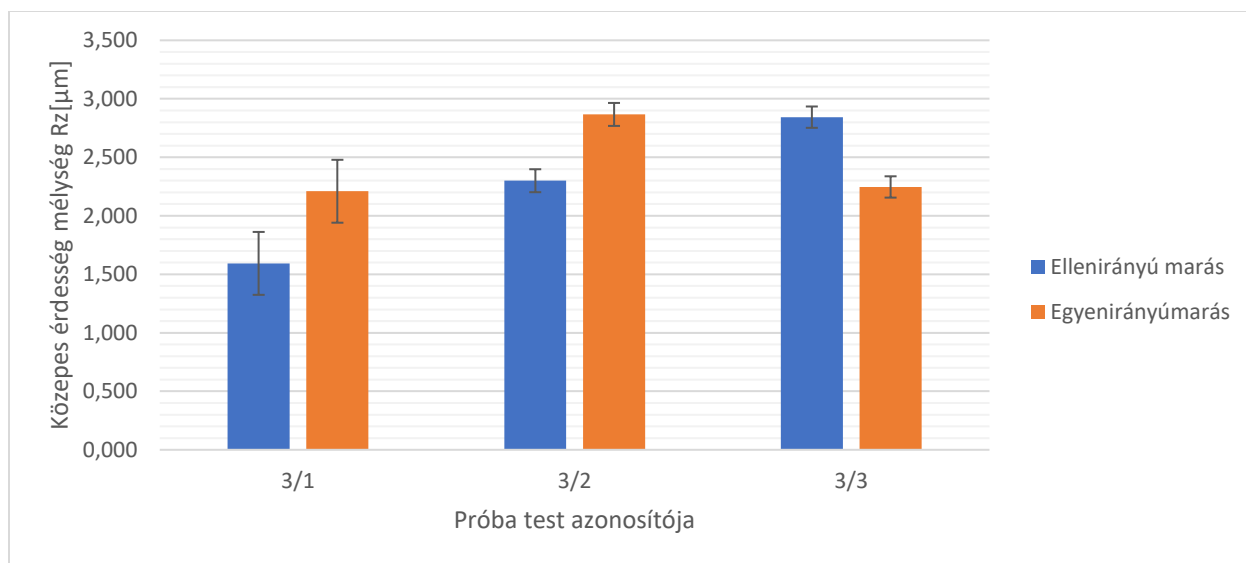
Grafikon 4: "2"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [ $\mu\text{m}$ ] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



Grafikon 5: "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.



Grafikon 6: "3"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért átlagos érdességek (Ra) [μm] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.



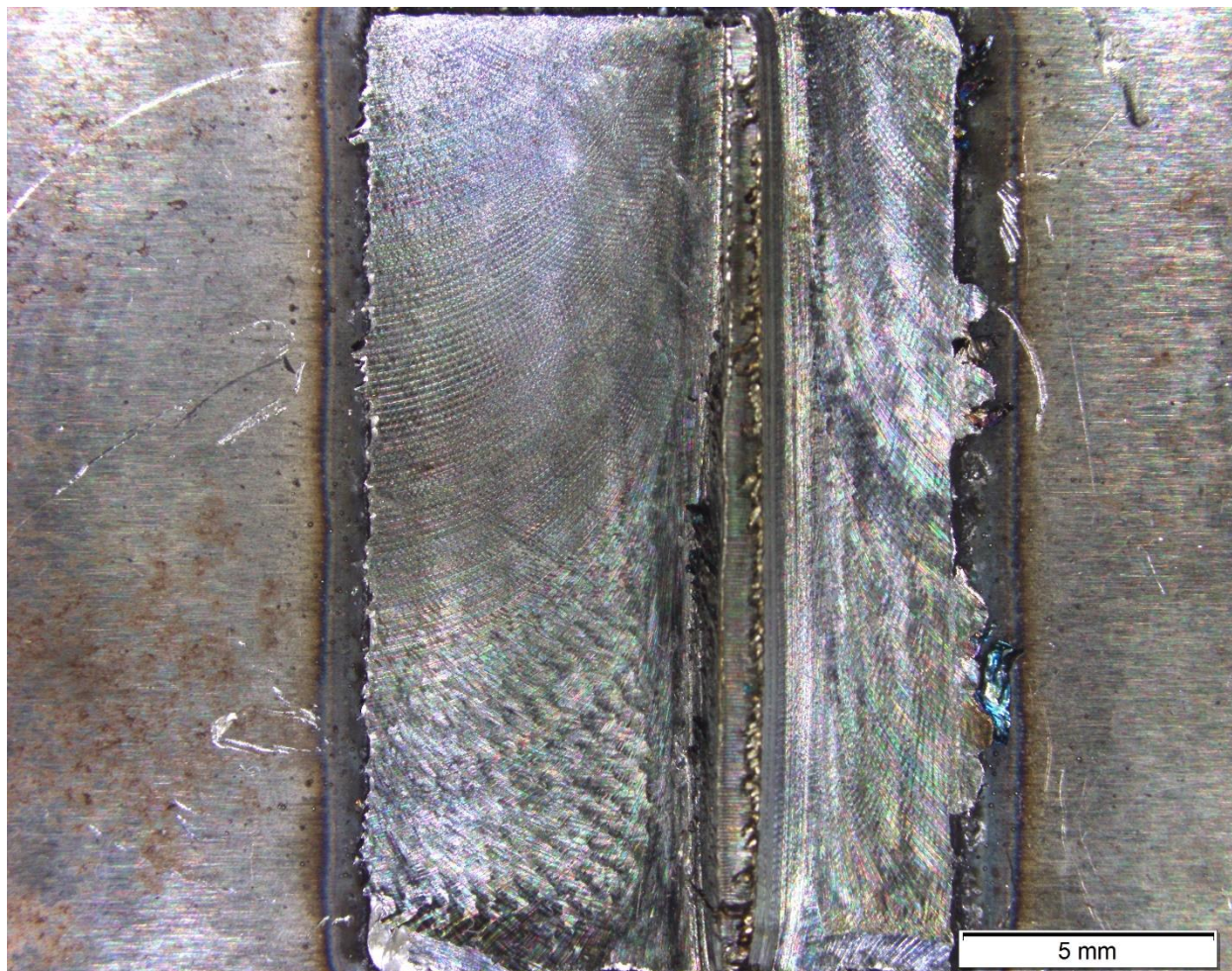
Grafikon 7: "3"-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolt felületén mért közepes érdesség mélységek ( $R_z$ ) [ $\mu\text{m}$ ] átlaga a mért adatok szórásával ábrázolva ellen- és egyenirányú marás esetében.

A forgácsolt anyag a nehezen forgácsolható melegalakító szerszámacél volt, mely nagy keménységgel rendelkezik. Éppen ezért a vizsgálatom során az alkalmazott szerszámlapka 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 „2”-es jelű alaplapon található próbatestek forgácsolása

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  $v_c = 170\text{ m/min}$  volt.

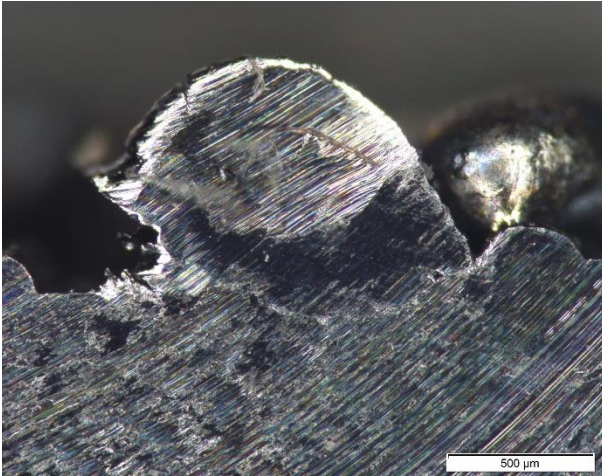
Összeségében megállapítható, hogy a rendelkezésre álló szerszámmal jó minőségű felületet sikerült elérni.  $f_z = 0,16\text{ mm/ford}$  előtolás esetén sikerült a  $R_a=0,8\mu\text{m}$ -es érték alatt stabilan gyártani, ami hagyományos szemlélettel nézve köszörült felületnek felel meg. A rendelkezésre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

Minden forgácsolt felületről készítettem mikroszkópos felvételt egy Olympus SZX16 sztereó mikroszkópon. Ezeket a képeket a 12.sz. Mellékletben csatolom.

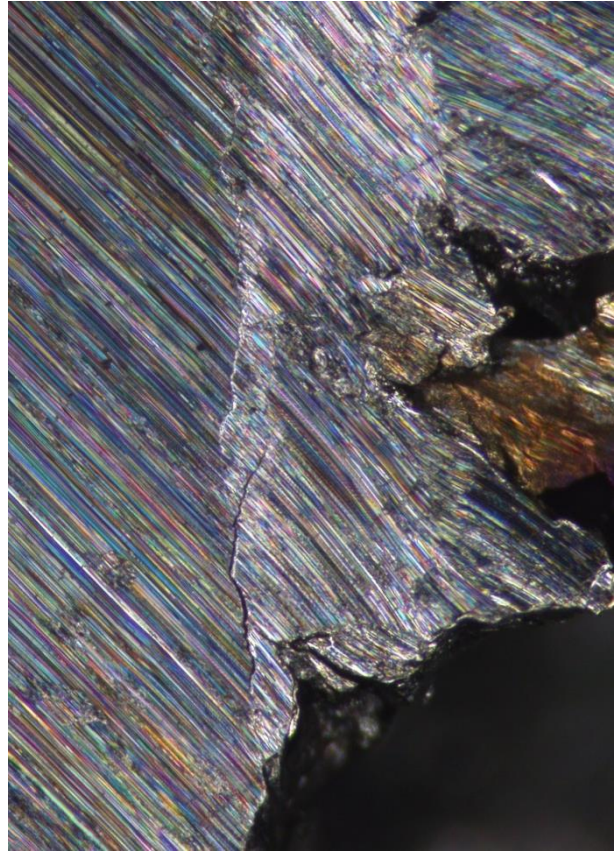


*Kép 14: "3/3"-as jelű próbatest forgácsolt felületeiről készült mikroszkópos kép*

A 14. Képen megfigyelhető az ellenirányú marás esetében a felület mintázatának megváltozása. Ennek a magyarázata a szerszám rezgésének növekedése lehet – melyet később a 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 mikrokeménységek nem mutatnak kiugróan magas eltérést, a megváltozott mintázatú területen. A mikrokeménység mérések alapján kijelenthetem, hogy az additív gyártott próba testek magas keménységgel rendelkeznek. Ebből kifolyólag a szerszám nagy mértékű kopást szenvedett a forgácsolás alatt. Valószínűleg a szerszámkopásával magyarázható a 12.Képen látható különbség a felület mintázatában.

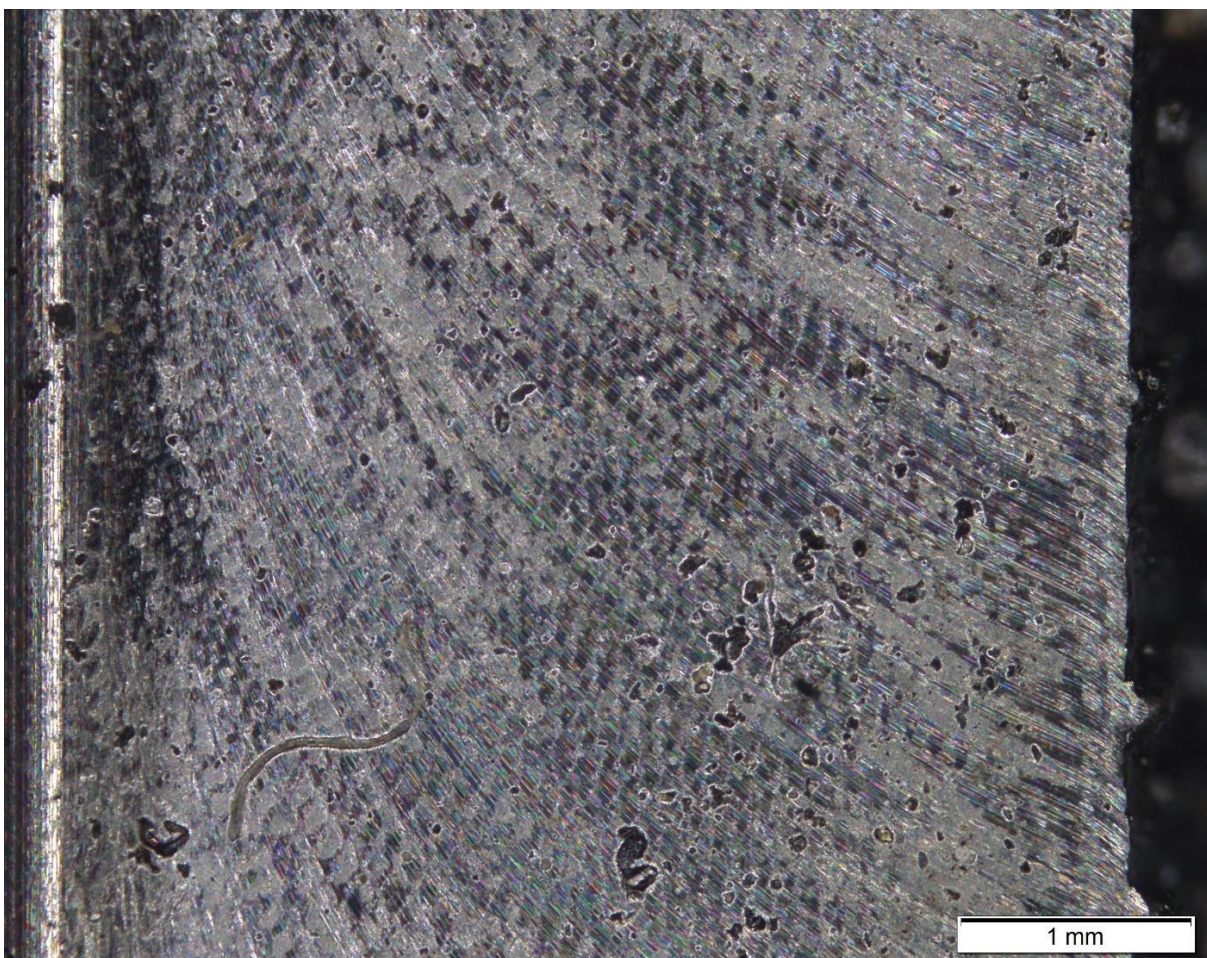


*Kép 15: Keresztül mart fröcskölődés az "1/2"-es próbatest felületén*



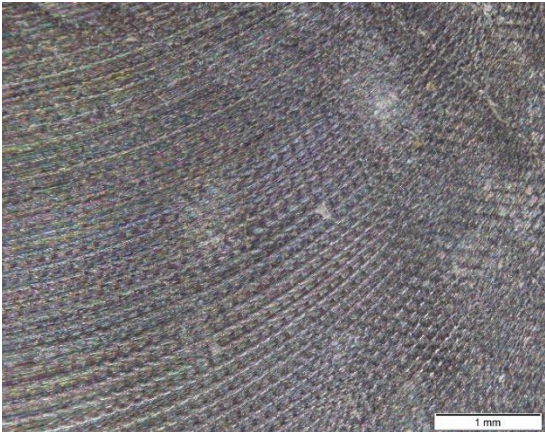
*Kép 16: Keresztül mart fröcskölődés a "3/3"-as próba test felületén*

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 15. és 16. Képen láthatóak a mintadarabok oldalán keletkezett fröcskölődések mikroszkópi képei. A 16. Képen jól látható a határvonal az alapanyag a rá fröcskölődött anyag között, illetve a határvonal mentén kialakult repedés.

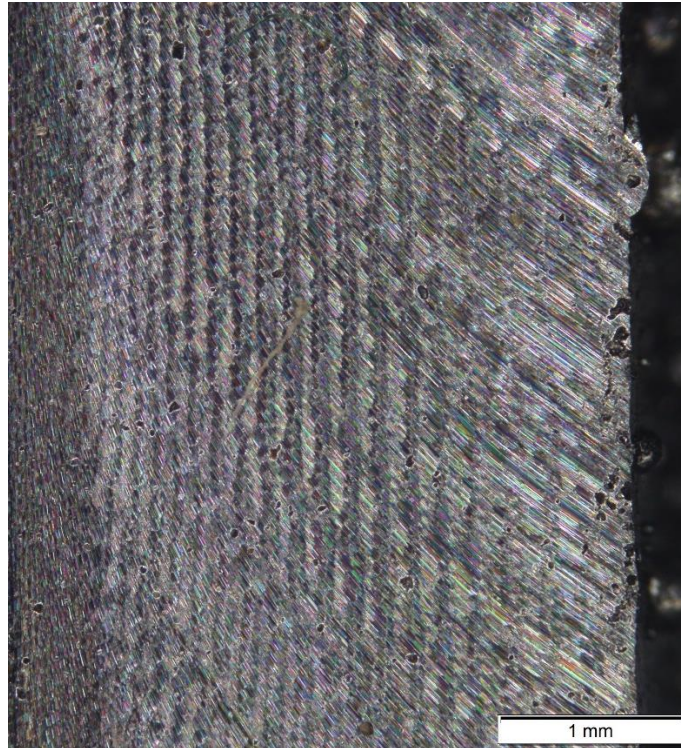


*Kép 17: Porozitások a „2/2”-es próbatestben*

Elmondható, hogy habár az általam alkalmazott technológiai paraméterek a gyártás során minden próbatest esetében megegyeztek, sajnos a külső körülményeket (hőmérséklet, páratartalom) nem ált módomban szabályozni. Ennek sajnos az gyártott mintadarabok homogenitása közti jelentős különbség lett az eredménye. A 17. Képen jól látható a mintadarab nagyfokú porozitása. Míg a 18. és 19. Képeken látható „2/1”-es próba test 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 próba test a gyártás magas ideje miatt két különböző munkanapon készültek, amikor értelemszerűen a csarnokban ahol a hegesztő berendezés megtalálható más körülmények uralkodtak.



*Kép 18: Porozitás mentes "3/3" - as próbatest*



*Kép 19: Magas fokú porozitással rendelkező "2/2"-es próbatest*

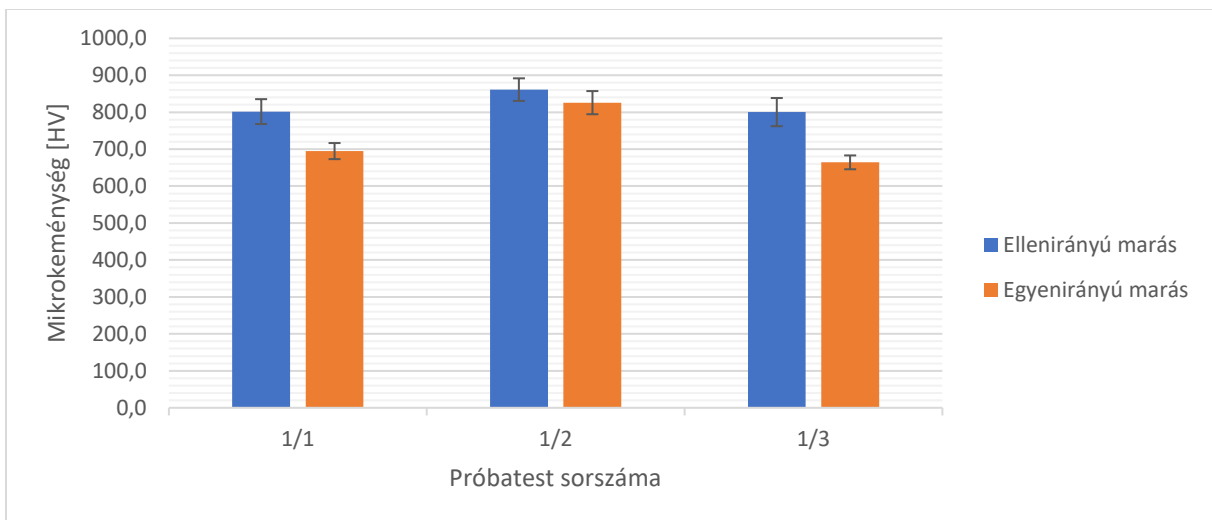
## Mikrokeménység mérése

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 mikrokeménységét, Vickers keménységben. Adott felületen mért keménységeknek meghatároztam az átlagát és a mért adatok szórását. Az így kapott mért és számolt adatokat a 10. sz. Mellékletben csatolom. A mért mikrokeménységeket grafikusán is ábrázoltam. Ezen oszlopdiagramokat a 11.sz. Mellékletben csatolom.

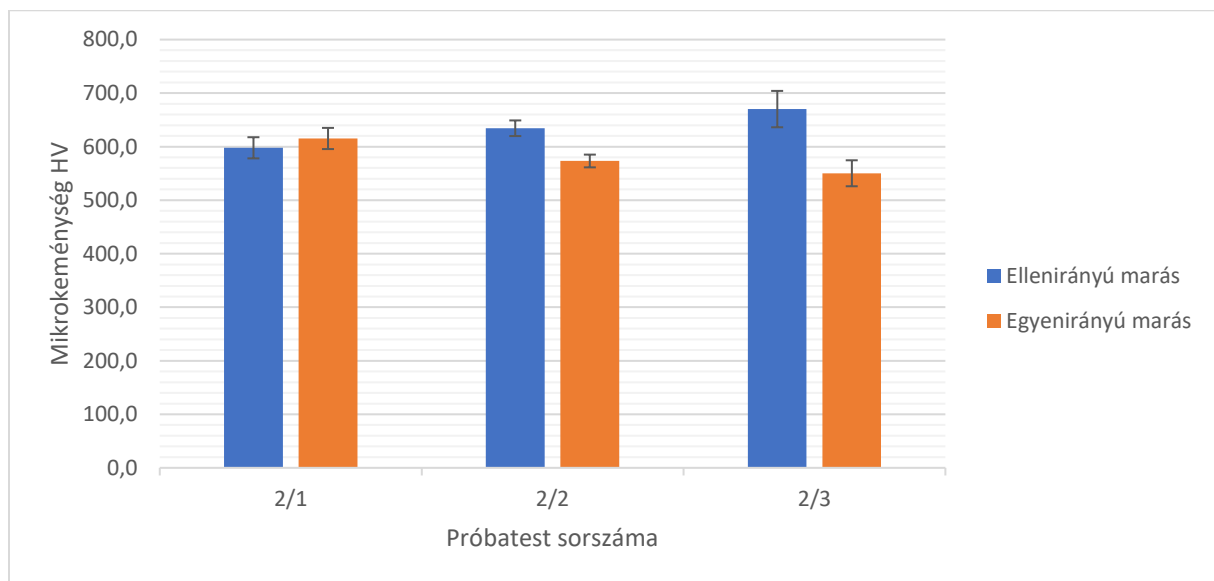


*Kép 20: Buehler Indentamet 1100 mikrokeménységmérő (HV/HK 10-1000g) (14)*

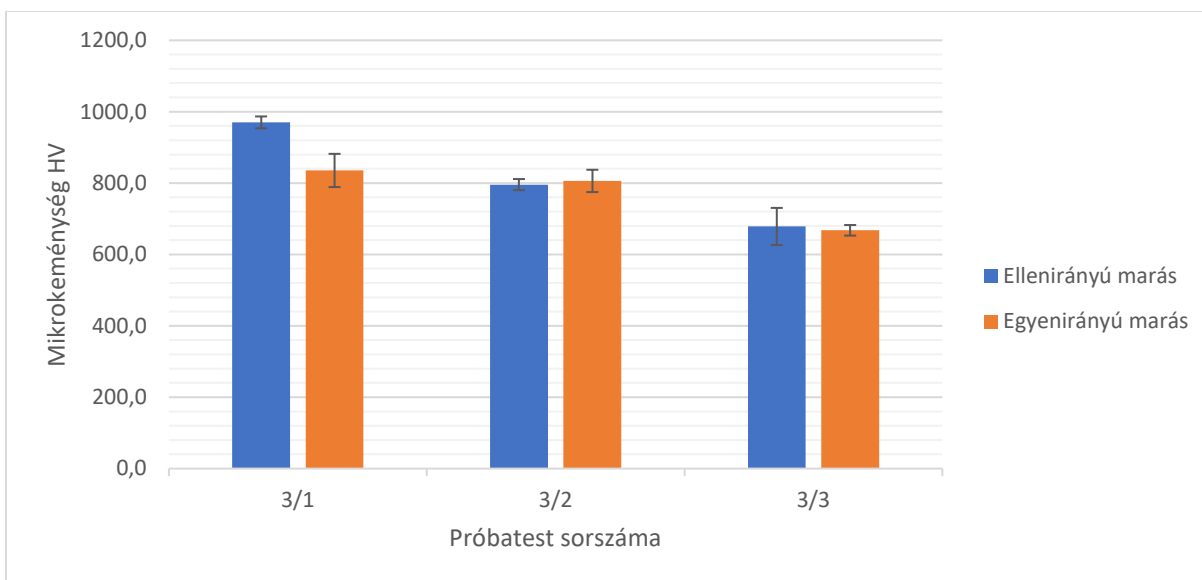
Az így kapott átlagokat oszlop diagramokon ábrázoltam – külön az egyen- és ellenirányú marásokat – feltüntetve a mért adatok szórását.



Grafikon 8: "1" -es jelű alaplagra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyen irányú marás esetében



Grafikon 9: "2" -es jelű alaplagra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyenirányú marás esetében



*Grafikon 10: "3"-es jelű alaplapra nyomtatott próbatestek forgácsolt felületeinek mért mikrokeménységének átlaga ellen- és egyenirányú marás esetében*

A keménység mérés alapján megállapítható, hogy az additív technológiával gyártott próba testek keménysége magas. A próbatestek átlagos keménysége 712 HV volt, ami már az edzett anyagok közé sorolható. A „2”-es és „3”-as jelű alaplap esetében a mért mikrokeménységek átlaga ellenirányú marás esetén nagyobb forgácsolási sebeség esetén növekvő, míg egyen irányú 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 (8) által kapott eredményeknek. Az additív technológiával gyártott AISI H13-as anyagú mintadarabok mikrokeménysége nagymértékű inhomogenitást mutat, mely jelen alkalmazott technológia sajátossága és ami a bevonatolás során elért különböző hőkezeltiségi állapotokkal magyarázható.

## Konklúzió, összefoglalás

A vizsgálataim során egyértelműen megállapítható, hogy a lézersugaras bevonatolással gyártott próbatestek magas fokú inhomogenitással rendelkeznek. Ezt igazolja a nagy mértékű szórás a mért mikrokeménységben és a forgácsolóerők 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 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 nagy mértékű 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. Az additív úton gyártott anyag nagymértékű inhomogenitása részben magyarázható a kialakult anyagszerkezettel. „Az alkalmazott technológiára jellemző az úgy nevezett „intrinsic” hőkezelés. Ennek során a korábban felvitt rétegek ismétlődő melegítésnek vannak kitéve az újonnan felvitt rétegek által. Ez a jelenség a 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 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 nagy mértékű inhomogenitás magyarázható az additív gyártás nem megfelelő külső körülményeivel. A csarnokban, melyben gépet üzemeltetnek 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 optimalizálást nagymértékben könnyíteni lehetne, illetve az inhomogenitás mérték csökkenteni. Véleményem szerint, ha a külső körülmények, állandók lennének a gép hosszútávú üzemeltetése során az magával vonná lézersugaras hegesztő berendezés ismétlési pontosságának javulását is.

## Hivatkozások

1. **Mills B., Redford A.H.** The Concept of Machinability. *Machinability of Engineering Materials*. Dordrecht : Springer, 1983.
2. **Hongyu Zheng, Kui Liu.** Machinability of Engineering Materials. [szerző] Andrew Y.C. Nee. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. London : Springer Vieweg, 2015.
3. **Smithells.** Metal cutting and forming. [szerző] T.C. Totemeier W.F. Gale. *Smithells Metals Reference Book*. hely nélkül. : Butterworth-Heinemann, 2004.
4. **Dietrich, Jochen.** *Praxis der Zerspantechnik*. Drezda : Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-14052-6.
5. **Tongchao Ding, Song Zhang, Yuanwei Wang, Xiaili Zhu.** Empirical models and optimal cutting parameters for cutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel. *International Journal of Manufacturing Technology*. 2010., 51.. kötet.
6. **Bing Wang, Zhanqiang Liu.** Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 55., 2016.
7. **J.J. Junzn Wang, M.Y. Zheng.** On the machining characteristics of H13 tool steel in different hardness states in ball end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003., 22.. kötet.
8. **Lucia Lizzula, Marco Sorgatoa, Rachele Bertolinia, Andrea Ghiottia, Stefania Bruschia, Francesco Fabbrob, Silvano Rechb.** 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.
9. **Gebhardt, Andreas.** *Additive Fertigungsverfahren*. ötödik. Kösel : Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN.
10. **Halász, Gábor.** A fém additív gyártás - úton a digitális sorozatgyártás felé I. rész. *Hegesztéstechnika*. 2020.
11. **CNC Media.** [Online] [Hivatkozva: 2021. szeptember szeptember.] <https://www.cnc.hu/2016/02/sokoldalal-lrs-evo-diodeline-dioda-gerjesztesu-lezer-az-or-laser-tol/>.
12. **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.

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

14. [Online]  
[https://www.researchgate.net/publication/317688928\\_Characterization\\_of\\_Microstructure\\_of\\_ODS\\_Steels/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/317688928_Characterization_of_Microstructure_of_ODS_Steels/figures?lo=1).

15. *Additive manufacturing of tool steel by laser metal deposition*. A. Bohlen, H. Freiß, M. Hunkel, F. Vollertsen,. hely nélk. : Procedia CIRP, 2018. ISSN 2212-8271.

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