Óbudai Egyetem
Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Mart felületek mikro- és makrogeometriai hibáinak vizsgálata

Habilitációs tézisfüzet

Szerző
Dr. Mikó Balázs
egyetemi docens
Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Budapest
2021.

„Nem számít semmi, csak az, hogy

Kérdezz! Keresd a választ!”

Tartalom

1. A kutatás előzményei 1
2. 3D felület marási eljárás vizsgálata 4
2.1 Az érdesség kísérleti vizsgálata 5
2.1.1 Előzetes vizsgálatok 5
2.1.2 A felület jellegének hatásának vizsgálata 7
2.1.3 Forgácsolási paraméterek széleskörű vizsgálata 8
2.2 Az érdesség geometriai vizsgálata 10
2.3 A dolgozó átmérő geometriai leírása 12
2.4 Tömbelektródás szikraforgácsolás vizsgálata 15
2.5 Tézisek 18
3. Teraszoló kontúrmarás eljárás vizsgálata 19
3.1 Az érdesség geometriai vizsgálata 19
3.2 Felületi érdesség technológiai vizsgálatai 23
3.2.1 A teraszoló kontúrmarás csúcsmagasságának kísérleti igazolása 23
3.2.2 Az előtolás hatásának vizsgálata 27
3.2.3 Előtolás és marási irány vizsgálata 29
3.2.4 A felületmeredekség hatása 31
3.3 Tézisek 33
4. Forgácsolt felületek makro geometriai vizsgálata 34
4.1 Minimum zóna módszer implementációinak vizsgálata 35
4.2 Pontkiválasztási stratégia hatása a síklapúsági hibára 39
4.3 Hibrid pontkiválasztási stratégia vizsgálata 41
4.4 Regresszió és extrapoláció alkalmazása a síklapúság meghatározásában 42
4.5 Tézisek 44
5. A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja 45
6. Irodalmi hivatkozások 46
7. A tézisekhez kapcsolódó publikációk 48

1. A kutatás előzményei

2001-ben megvédett PhD disszertációm témája „Technológiai előtervezés automatizálása mesterséges intelligencia módszerek segítségével” volt [Mik2001]. Ezt követő időszakban, a téma folytatásaként alkatrészek gyártási idő- és költségbecslésével foglalkoztam, majd érdeklődésem műanyag fröccsöntő szerszámok költségbecslése felé fordult. A szerszámgyártáshoz kapcsolódóan foglalkoztam CAM rendszerek alkalmazásával, szabad formájú felületek megmunkálásával. E mellett egyéb témákban is jelentek meg publikációim, mint például forgácsoló eljárások és szerszámok vizsgálata, prototípus gyártási eljárások, robottechnika (1. táblázat).

1. táblázat Kutatási témák

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Technológiai előtervezés																										
Költségbecslés - alkatrész gyártás																										
Költségbecslés - fröccsöntő szerszám																										
Forgácsoló eljárások és szerszámok																										
CAM/CAE rendszerek alkalmazása																										
Prototípus gyártás (RP, RE)																										
Szikraforgácsolás																										
3D marás																										
Teraszoló marás																										
GPS (alak és helyzettűrés)																										

Jelen tézisfüzetben a szabad formájú felületek megmunkálásához kapcsolódó kutatásaimat és a geometriai tűrésezés technológiai kérdéseivel foglalkozó eredményeimet ismertetem. A bemutatott eredmények publikációs szempontból 2011-2021. közötti időszakot ölelik fel.

Alkatrészgyártás során eltérések mutatkoznak a tervezett és a legyártott alkatrész tulajdonságok között. Ezen eltérések okai a rendszer paramétereinek (anyag, gép, szerszám, készülék, technológia, mérés, környezet, ember stb.) változásában, bizonytalanságában keresendők. Az eltérések mértéke megfelelő folyamat tervezéssel csökkenthető, de kiküszöbölni nem lehet, ezért definiáljuk a tűréseket, mint a megengedett hiba mértékét. A munkadarab geometriáját tekintve definiálható méret tűrés [ISO14405], alak tűrés, helyzet tűrés [ISO1101] és felületi érdesség [ISO4187]. A tűrések típusának és nagyságának meghatározása során a konstrukciós tervező figyelembe veszi az alkatrész funkcióját, jellegét, méretét, anyagát, a gyártási és szerelési technológiák képességeit [Hen2006]. Ennek során több, egymásnak ellentmondó követelménynek kell megfelelni. A konstruktőrnek kapcsolatot kell teremtenie a termékkel kapcsolatos funkcionális elvárások és a tűrések között

A felületi érdesség értelmezését szabványok határozzák meg, de ennek létrehozása a folyamattervező feladata. Benardos és Vosniakos [Ber2003] 19 paramétert sorol fel, amelyek hatással vannak a megmunkált felület felületi érdességére. A négy fő csoport: forgácsoló szerszám, megmunkálási paraméterek, munkadarab tulajdonságai és forgácsolási jelenségek.

Az érdesség becslésének *geometriai megközelítés*e az egyik, megmunkálási elméleten alapuló módszer, amely figyelembe veszi a forgácsoló szerszám geometriai adatait és a felület geometriáját [Bil2014][Fel2015][Gra2015][Vyb2016][Xu2018]. Leírja a forgácsoló szerszám által létrehozott mikro geometriát a felületen, és a felületi érdességet a csúcsmagasság alapján becsüljük meg [Grz2010]. Ennek a megközelítésnek az előnye a felületi mikro-geometria egyértelmű leírása, de nem tudja figyelembe venni az egyéb körülményeket, mint például az alkatrész anyagtulajdonságait, a rendszer rezgését (szerszám, rögzítőelem és szerszámgép), vagy a forgácsolási paramétereket.

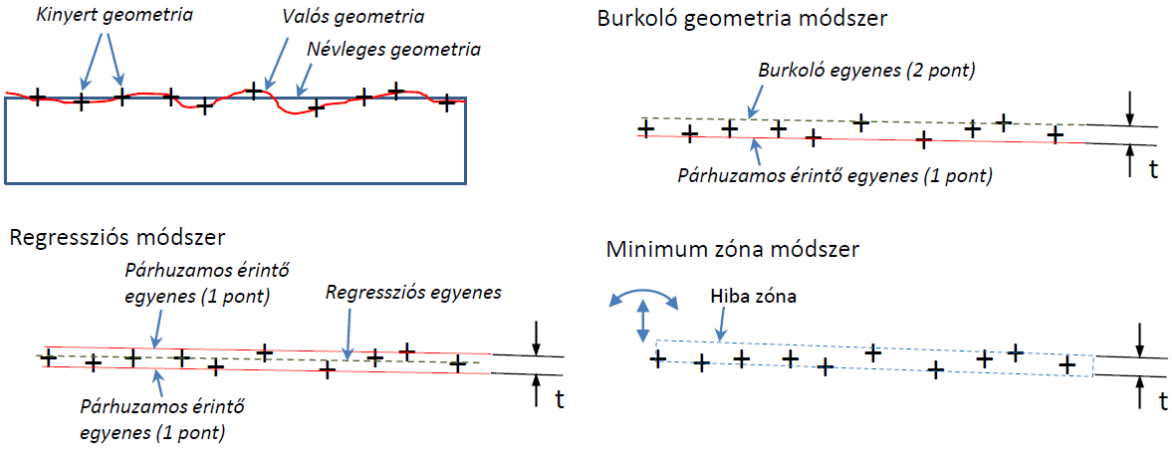
A *kísérlet alapú megközelítés* az egész rendszert megvizsgálja, és számos paramétert figyelembe vesz, például forgácsolási paraméterek [Fan2014] [Sou2014a] [Woj2014], ébredő erők [Zeb2014][Woj2015], munkadarab anyag [Fod2012], szerszám anyag [Vop2015], mozgás stratégia [Sou2014b][Pen2015][Sal2016][Izo2016]. Marási kísérletek alapján összefüggés fedezhető fel a felületi érdesség és a kiválasztott paraméterek között. Ez a kapcsolat statisztikai módszerekkel, regresszióanalízissel vagy mesterséges neurális hálózatokkal írható le [Pen2015] [Kov2017].

A mérettűrések önmagukban nem elegendők a pontos geometria definiálására, így az utóbbi évtizedben előtérbe kerültek az alak- és helyzettűrések alkalmazásai, mely folyamat magával hozta ezek definiálásával, értelmezésével, mérésével és gyártásával kapcsolatos problémákat [Mar2015][Nagy2015]. Az alkalmazható tűrés típusokat az ISO 1101-2017 szabvány tartalmazza [ISO1101].

Koordináta méréstechnikai eszközzel (mérőgép, mérőkar, 3D szkenner stb.) végzett mérés esetén pontokat veszünk fel a felületen (kinyert geometria), és ezen pontokkal helyettesítjük a legyártott felületet. A ponthalmaz méretéről és a határoló elemek meghatározásának módszeréről a szabvány nem rendelkezik.

Az alak- és helyzet hibák meghatározására alapvetően három módszerét alkalmazhatunk. A burkoló geometria esetén a felületet kívülről vagy belülről burkoló ideális geometriai elemet (egyenes, sík, kör, henger) határozunk meg és ettől mérjük a kinyert geometria pontjainak távolságát. Regressziós módszer esetén a kinyert geometria pontjaira illesztünk ideális geometriai elemet és ettől mérjük az egyes pontok távolságait. Minimum zóna módszer esetén egy hiba sávot illesztünk a kinyert geometria pontjaira a tűrés típus, a tűrésezett geometria és

az esetleges bázis elem tulajdonságai által meghatározott szabadságfokok mentén. A 1. ábra egyenesség hiba esetén mutatja ezen módszerek értelmezését. A bemutatott kutatások során minimum zóna módszert alkalmaztam síklapúsági hiba meghatározására.



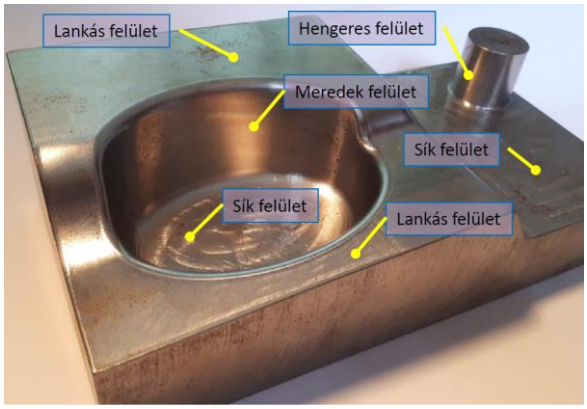
1. ábra Geometriai hiba meghatározásának módszerei.

A bemutatott **kutatások célja** szabad formájú felületek mikro pontosságának, valamint a geometriai tűrések technológiai vizsgálata. A technológiai vizsgálat egyrészt méréstechnikai vizsgálatot jelent, másrészt gyártástechnológiai elemzést. Forgácsolt felületek pontosságának (mikro és makro) becslése biztosítja a megmunkált felület geometriájának pontosabb szimulációját, valamint a megmunkálási, szerszám- és szerszámpálya-paraméterek optimalizálását a CAM rendszerekben a gyártási folyamat tervezése során. A kutatás eredményei segítik a CAM rendszerekkel végzett munkát, és biztosítják a paraméterek jobb kiválasztását és a felület minőségének pontosabb szimulációját.

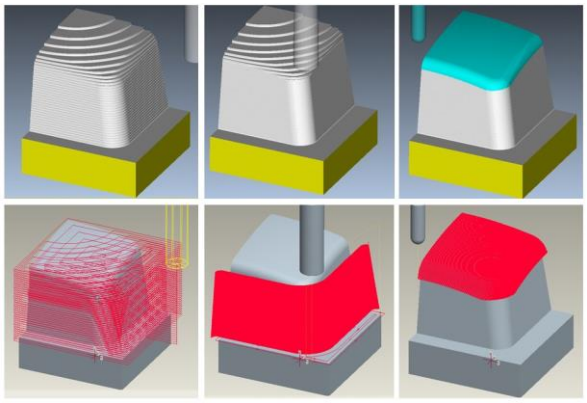
2. 3D felület marási eljárás vizsgálata

A szabad formájú felületeknek alapvető szerepük van olyan gépalkatrészek esetén, amikor az esztétikai vagy áramlástani szempontok határozzák meg a formatervet, mint például a karosszéria elemek és a utastér burkolati elemek, vagy háztartási készülékek burkolatai. Az ilyen alkatrészeket előállító alakító-, öntő szerszámok az alkatrész felületének negatív formáját tartalmazzák, melyek megmunkálása általában 3D vagy 5D marási technológiával történik. Szabad formájú felület marás esetén nagyon fontos a makro- és mikropontosság, mivel ezek a felületek általában öntőformák vagy alakító szerszámok részei, melyek felülete átmásolódik az öntött, fröccsöntött vagy alakított felületre. Ugyanakkor az öntőformák és alakítóformák gyártása egyedi gyártás, a hatékony gyártás fontos szempont a jó felületi pontosság és a megfelelő felületi minőség mellett.

Bonyolult felületek marása esetén a CNC programot CAM rendszerrel generáljuk, mivel a szerszámpálya-előállítás bonyolult számítást igényel. A CAM rendszerek számos marási stratégiát tartalmaznak, amelyek meghatározzák a műveletelem típusát. A megmunkálás tervezése során a technológus mérnök (felhasználó) kiválasztja a stratégiát, beállítja a marószerszám adatait, a forgácsolási paramétereket, kiválasztja a megmunkálás területét. A CAM szimuláció segít a felület minőségének megjelenítésében. A különböző típusú felületek különböző megmunkálási stratégiákat igényelnek. Marás esetén a simítás megvalósítható [Toh2005] 3D felület marással gömbvégű maróval lankás felület esetén, vagy teraszoló kontúrmarással újjmaróval vagy toroid (sarokrádiuszos) maróval meredek felület esetén (2. ábra). A legfontosabb stratégiák a térfogatmarás, a kontúr marás és a felületi marás (3. ábra). Általában a térfogat marás nagyoló, a kontúr és felületmarás simító megmunkálás.



2. ábra Többféle felületet tartalmazó teszt darab.



3. ábra Térfogat marás, kontúr marás és felület marás.

A szabad formájú felületek gömbvégű szerszámmal történő marása az egyik leggyakrabban alkalmazott technológia a simítás során. Alapvetően a forgó maró meghatározott sebességgel követi a felületet (előtolási sebesség, v_f), és a felület határán oldallépés (a_p) után visszafordul.

Ez a stratégia alkalmas CNC-marógépen a nem alámetszett, lankás felületek elősimítására és simítására. Jelen fejezet gömbvégű maróval végzett felületmarás érdességének vizsgálatát mutatja be.

2.1 Az érdesség kísérleti vizsgálata

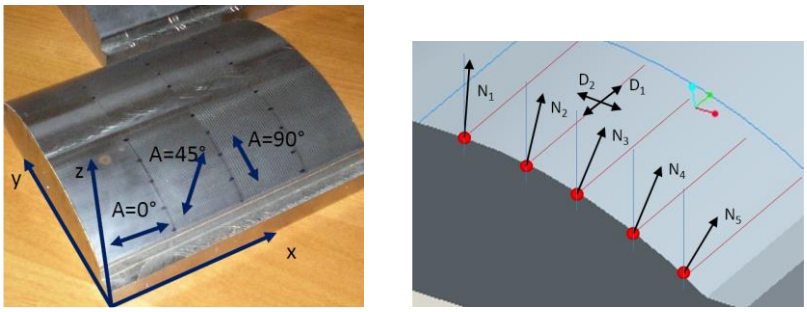
A bemutatott marási kísérleteket a Tanszék[1] gépműhelyében végeztem egy Mazak 410-AII CNC vezérlésű megmunkáló központon, a szükséges NC programokat ProEngineer WF4 illetve CATIA v5 CAD/CAM rendszerrel állítottuk elő. A felületi érdességet Mahr-Perten GD120 érdesség mérővel mértük. A szikraforgácsolási kísérletek során a lépcső mérete (3.4 fejezet) Mitutoyo PJ-H3000F projektorral (50x nagyítás), a mélysége mérőórával lett megmérve. Az adatok feldolgozásához MS Excel és Minitab v14 szoftvereket használtunk.

2.1.1 Előzetes vizsgálatok

A kutatás megkezdésekor előzetes vizsgálatokat végeztem a gömbvégű maróval történő felület marás tanulmányozására [1][3]. Ezek eredménye alapján kerültek meghatározásra a további vizsgálatok paraméterei. A tesztdarab 42CrMo4 (W.No. 1.7225 Rm=1000 MPa) acélból készült, a mérete 175x165x45 mm, a vizsgált felület 100 mm sugarú hengerpalást. A kísérletekhez 12 mm átmérőjű két élű gömbvégű marót használtunk (Fraisa U5286.501). A simítási ráhagyás értéke 0.2 mm, a fordulatszámot 3 szinten (n = 7430/5570/3715 1/min), az oldallépést szintén 3 szinten (a_e = 0.8/0.5/0.2 mm) változtattuk. A fogankénti előtolást értéke állandó volt (f_z = 0.085 mm), az előtolási sebesség a fordulatszám miatt szintén három féle (v_f = 1265/950/630 mm/min).

Az előtolás iránya (A) az x tengellyel bezárt szöggel adott (4. ábra a). Az egyes beállításokat az 2. táblázat mutatja. A kísérletek három szakaszban készültek. A 13. felület esetén sávonként változó fordulatszámmal történt a forgácsolás, a dolgozó átmérő változását figyelembe véve, állandó forgácsolási sebesség biztosítása érdekében. Az érdességet 5 pontban, az előtolásra merőlegesen mértük (4. ábra b). A felületi normális szöge N_i: 2.9º; 11.5º; 20.4º; 30.0º; 36.9º (i=1...5).

[1] Óbudai Egyetem; Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki kar; Anyag- és Gyártástudományi Intézet; Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék.



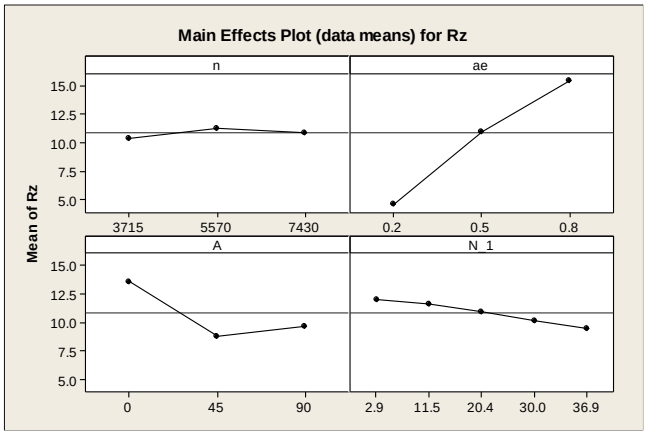
a) *b)*

4. ábra Példa marási beállításokra b) Érdesség mérés helye.

A főhatás ábrák azt mutatják (5. ábra), hogy a fordulatszám csak kis mértékben befolyásolja az érdességet, a legnagyobb hatása az oldallépésnek (forgásszélesség) van. Az előtolás irányának szintén jelentős hatása van, x tengellyel párhuzamos irány (A=0°) kedvezőtlen. A felület meredekség növekedésével (N) az érdesség érteke csökken.

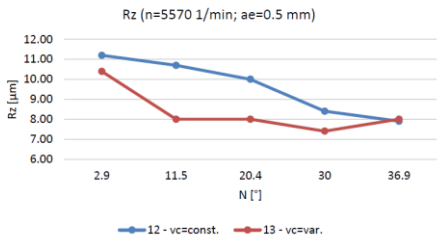
2. táblázat Kísérleti beállítások.

No.	n [1/min]	v_f [mm/min]	a_e [mm]	A [°]
1	7430	1265	0.2	90
2	5570	950	0.5	90
3	3715	630	0.8	90
4	3715	630	0.2	0
5	5570	950	0.5	0
6	7430	1265	0.8	0
7	7430	1265	0.5	0
8	5570	950	0.8	90
9	7430	1265	0.2	45
10	5570	950	0.5	45
11	3715	630	0.8	45
12	5570	950	0.5	0
13	9700	1467	0.5	0
13	6700	1069	0.5	0
13	5200	857	0.5	0
13	4300	732	0.5	0
13	3900	690	0.5	0



5. ábra Az érdesség főhatás ábrái.

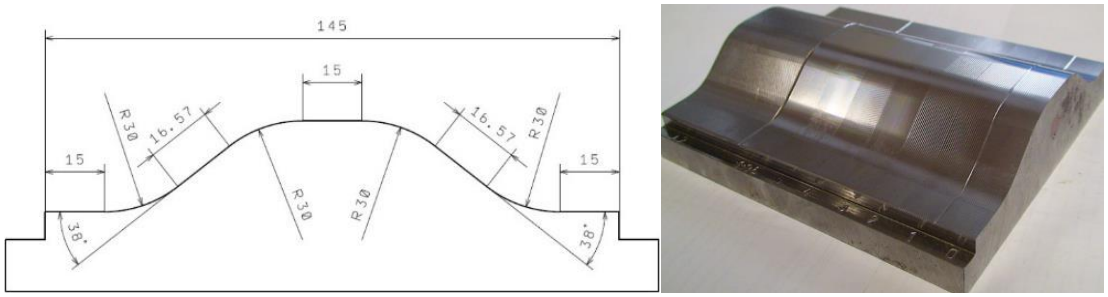
A 12. és 13. beállítások összehasonlítása megmutatja (6. ábra), hogy a tényleges forgácsolási sebesség állandó értéken tartásával - ami a fordulatszám változtatásával oldható meg, figyelembe véve a dolgozó átmérőt - a felületi érdesség befolyásolható, a kis meredekség kivételével, az érdesség közel állandó értékű.



6. ábra Az érdesség alakulása a 12. és 13. beállítás esetén.

2.1.2 A felület jellegének hatásának vizsgálata

A második kísérlet sorozat egy módosított geometriájú tesztdarabbal készült [4][6], melynek anyaga 42CrMo4 acél, mérete 175x165x45, egy teszt felület 17 mm széles. A teszt felület 9 részből állt: három 15 mm hosszú vízszintes szakaszból áll, melyeket 38°-os lejtő és 30 mm-es rádiusz köt össze. Két szerszám került összehasonlításra. A T1 jelű Fraisa 7450.450 típusú, 10 mm átmérőjű 2 élű gömbvégű maró, a T2 Fraisa 7450.451, azonos méretű, de 4 élű szerszám.



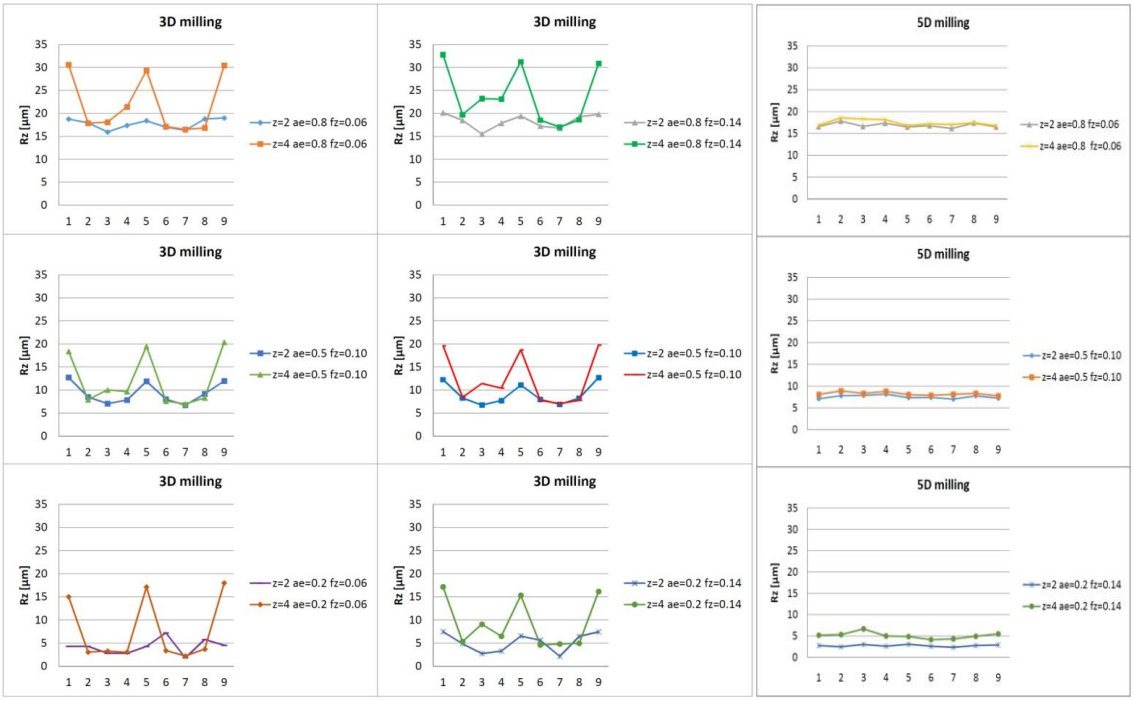
7. ábra Teszt alkatrész geometriája.

A simítási ráhagyás 0.3 mm, a névleges forgácsolási sebesség v_c = 140 m/min (n = 4450 1/min) volt. A fogásszélesség (oldallépés) és a fogankénti előtolás (fz) 3-3 szinten lett megválasztva. A paraméter beállításokat a 3. táblázat tartalmazza. A 3D marás esetén Taguchi kísérlet tervet használtunk, az 5D-s marás nem tervezett. Összesen 162 felület darab érdessége lett vizsgálva. A marás során csak y irányú előtolást használtunk (A=90°), oda-vissza (zig-zag) marási stratégiával. Az 5D-s marás Deckel Maho DMC 75V CNC megmunkáló központon készült.

3. táblázat Kísérleti beállítások.

No	DoF	T	a_e [mm]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	No	DoF	T	a_e [mm]	f_z [mm]	v_f [mm/min]
1	3D	T1	0.8	0.06	534	10	3D	T2	0.5	0.10	1780
2	3D	T1	0.8	0.14	1246	11	3D	T2	0.2	0.06	1068
3	3D	T1	0.2	0.14	1246	12	3D	T2	0.5	0.10	1780
4	3D	T1	0.5	0.10	890	13	5D	T1	0.5	0.10	890
5	3D	T1	0.2	0.06	534	14	5D	T1	0.8	0.06	534
6	3D	T1	0.5	0.10	890	15	5D	T1	0.2	0.14	1246
7	3D	T2	0.8	0.06	1068	16	5D	T2	0.5	0.10	1780
8	3D	T2	0.8	0.14	2492	17	5D	T2	0.8	0.06	1068
9	3D	T2	0.2	0.14	2492	18	5D	T2	0.2	0.14	2492

A mérési eredmények alapján megállapítható (8. ábra), hogy 3D marás esetén a 2 élű szerszám kisebb és egyenletesebb érdességet állít elő. Ez a különbség 5D marás esetén nem jelentkezik, a felületi érdeség egyenletes. 5D marás esetén a dolgozó átmérő állandó értékű volt.



8. ábra Az érdesség mérés eredményei.

A kiugró érdességi értékek a vízszintes felületeken jelentkeznek, ahol kisebb a szerszám dolgozó átmérője és így a forgácsolási sebesség. A 2 élű szerszámnál ez az érdesség romlás kisebb mértékű. Az előtolás kis hatással van csak az érdességre.

2.1.3 Forgácsolási paraméterek széleskörű vizsgálata

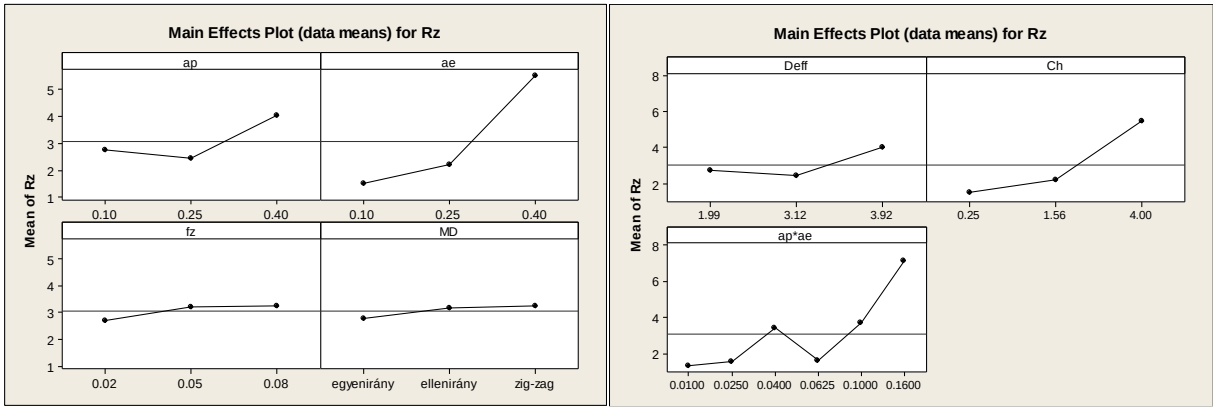
A harmadik teszt sorozat célja a forgácsolási paraméterek szélesebb körű vizsgálata [7]. A teszt darab anyaga 42CrMo4 acél, a mart felületek 20x20 mm méretű vízszintes felületek (9. ábra). 10 mm átmérőjű 2 élű tömör keményfém gömbvégű marót használtunk, melynek gyártója és típusa NC-MILL G9F-44-100N-2F. Állandó v_c = 250 m/min névleges forgácsolási sebességet, n = 8000 1/min fordulatszámot alkalmaztunk. A fogásmélységet (a_p), a fogás szélességet (a_e) és a fogankénti előtolást (f_z) 3 szinten változtattuk, valamint a marás iránya szintén három féle stratégiát követett (4. táblázat). Teljes faktoriális kísérlet tervet használva 81 beállítás mellett végeztük a kísérleteket.

4. táblázat Kísérleti beállítások.

Szint	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]	Marási irány (MD)	
1	0.10	0.10	0.02	Egyenirányú marás	1
2	0.25	0.25	0.05	Zig-zag	0
3	0.40	0.40	0.08	Ellenirányú marás	-1

9. ábra 3 teszt alkatrész a 9-ből.

Az eredmények statisztikai elemzése azt mutatja (10. ábra), hogy a nagyobb fogásmélység (a_p) és a nagyobb fogás szélesség (a_e) rontja az érdességet. A fogás szélesség hatása nagyobb. Az előtolás növelése és a marási irány csak kis mértékben befolyásolja a felületi érdességet. A dolgozó átmérő és ezzel a forgácsolási sebesség növekedése szintén nagyobb érdességet eredményez, de meg kell jegyezni, hogy ebben az esetben a nagyobb dolgozó átmérő a nagyobb fogásmélységből ered, tehát a szerszám terhelése növekszik. Ezt mutatja az $a_p \cdot a_e$ szorzat hatása is. A kialakuló barázdák magassága (Ch) egyértelmű kapcsolatot mutat a felületi érdesség Rz értékeivel.



10. ábra Főhatás ábrák.

A felületi érdességet, mint azt a 11. ábra a) mutatja, nem lehet közvetlenül megfeleltetni a felületi érdesség Rz paraméterének. Egy korrekciós tényező bevezetésével azonban javítani lehet a becslés pontosságán. A korrekciós tényező számításánál jelen kísérlet során a fogásmélység, a fogásszélesség és a fogankénti előtolást vettük figyelembe. A marási irány hatása elhanyagolható, a dolgozó átmérő a felület jellege miatt pedig csak a fogásmélységtől függ, ezért nem lett figyelembe véve.

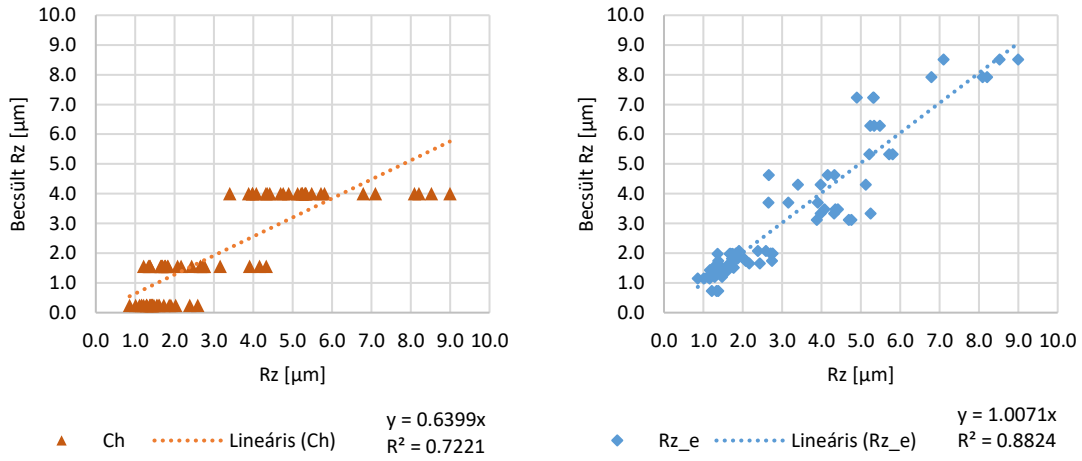
$$Rz = C(x) \cdot Ch \qquad (2\text{-}1)$$

```
C(x) = 9.92 - 12.9 ap - 56.7 ae + 41.2 fz + 31.1 ap^2 + 100 ae^2 - 279 fz^2 - 15.4 ae*ap -
98.5 ae*fz + 98.4 ap*fz

Predictor       Coef  SE Coef       T      P
Constant      9.9207   0.6914   14.35  0.000
ap           -12.947    3.288   -3.94  0.000
ae           -56.726    3.288  -17.25  0.000
fz             41.23    16.44    2.51  0.014
ap^2          31.062    5.813    5.34  0.000
ae^2         100.346    5.813   17.26  0.000
fz^2          -279.0    145.3   -1.92  0.059
ae*ap        -15.407    4.110   -3.75  0.000
ae*fz         -98.52    20.55   -4.79  0.000
ap*fz          98.40    20.55    4.79  0.000

S = 0.554913   R-Sq = 95.2%   R-Sq(adj) = 94.6%
```

A korrekciós tényezővel módosított barázdamagasság már alkalmasabb az érdesség előrejelzésére (11. ábra b). Ebből következik, hogy szükséges egy olyan általános geometriai modell megalkotása, amely tetszőleges felület helyzet és előtolás irány mellett leírja a barázda magasság értékét.

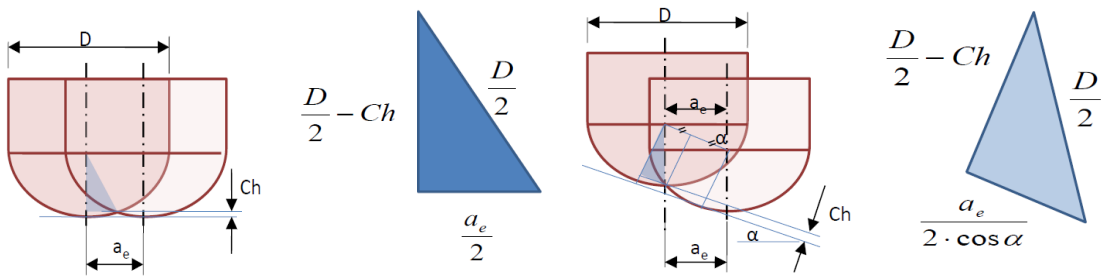


a) *b)*

11. ábra Felületi érdesség becsült értékei.

2.2 Az érdesség geometriai vizsgálata

Gömbvégű maróval végzett sík felület megmunkálása esetén a barázdamagasságot a fogásszélességre egymást követő szerszámkontúrok alapján lehet meghatározni (12. ábra). A két alap esetben, amikor az előtolás iránya egybeesik a felület meredekségével (a), illetve amikor erre merőleges (b), egyszerűen számítható (α - a felület meredeksége).



a) *b)*

12. ábra Barázda magasság vízszintes és döntött felület esetén.

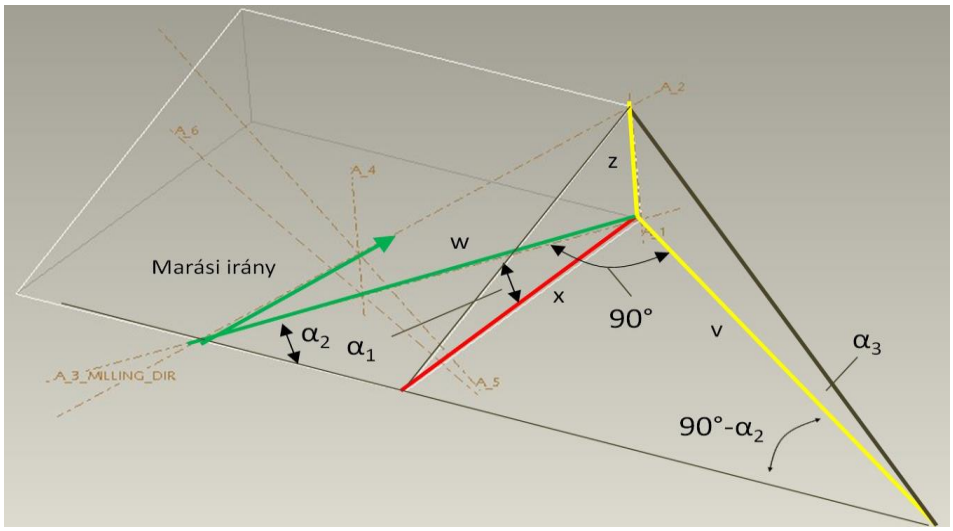
$$Ch = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2} \tag{2-2}$$

$$Ch = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_e}{2 \cdot cos\alpha}\right)^2} \tag{2-3}$$

Általános előtolás irány esetén (13. ábra) α_1 meredekségű felület és α_2 előtolási irányú esetén a felület előtolás irányára merőleges meredeksége α_3, mely alapján a barázda magasság meghatározható [1].

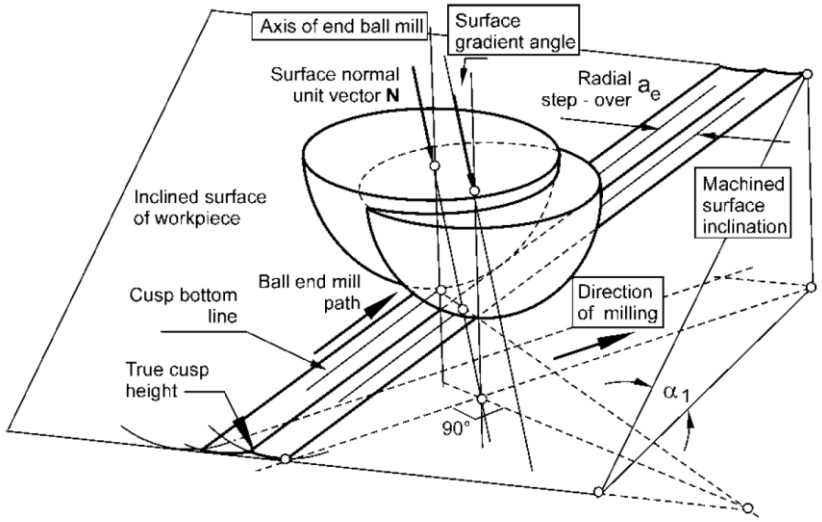
$$\alpha_3 = arctg(tg\alpha_1 \cdot cos\alpha_2) \tag{2-4}$$

$$Ch = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_e}{2 \cdot cos\alpha_3}\right)^2} \tag{2-5}$$



13. ábra Szögértékek általános irányú előtolás esetén.

Mivel felület marás esetén a fogásszélesség értékét az x-y síkban méri a CAM rendszer, így a bemutatott modell alapján a barázda magasság a felület meredekségével és az előtolás irányának változásával módosul.



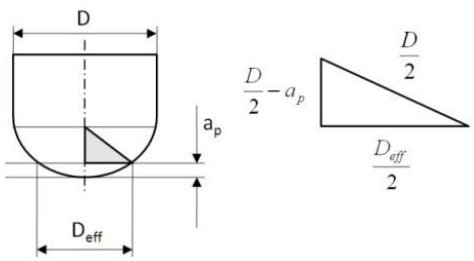
14. ábra Barázda magasság geometriai modellje.

A bemutatott modell esetén sík felületet vizsgáltam. A modell tehát abban az esetben helytálló, ha a felület lokálisan síkkal helyettesíthető, a felület meredekségében hirtelen változás nem történik. További kutatás tárgya, ezen közelítés okozta elvi eltérés meghatározása, illetve a módszer kiterjesztése ívelt felülettel történő közelítés esetére.

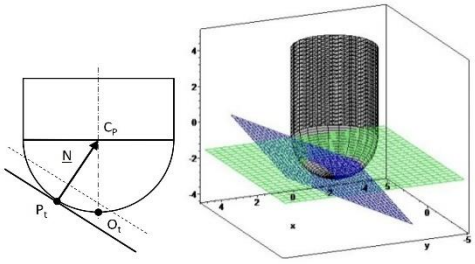
2.3 A dolgozó átmérő geometriai leírása

A maró gömb geometriájú részén a megmunkálandó síkkal párhuzamosan eltolt sík egy kört metsz ki, ennek átmérője a dolgozó átmérő [9]. A dolgozó átmérő egy gömbvégű szerszám a fogásmélység (a_p) és a szerszám átmérő (D) függvényében egy vízszintes sík felület esetén a 15. ábra szerint határozható meg:

$$D_{eff} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a_p\right)^2} \tag{2-6}$$



15. ábra Dolgozó átmérő vízszintes sík esetén.



16. ábra A sík általános helyzete

Egy általános helyzetű sík esetén (16. ábra) ez a metszeti kör a felülettel együtt új helyzetbe kerül. A kör pontjainak a szerszám tengelyétől mért távolsága adja az aktuális dolgozó átmérő értékét (17. ábra). A kör egyenlete a szerszám csúcsához rögzített koordináta rendszerben:

$$\underline{Cr}_{eff} = \begin{bmatrix} R_{eff} \cdot \cos(2\pi t) \\ R_{eff} \cdot \sin(2\pi t) \\ a_p \\ 1 \end{bmatrix}, t \in [0,1] \tag{2-7}$$

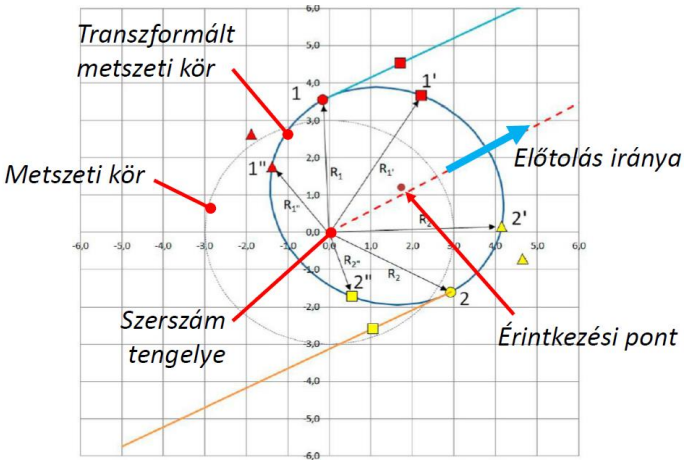
$$R_{eff} = \frac{D_{eff}}{2} \tag{2-8}$$

A szerszám és a felület közöti kontakt pont:

$$\underline{P_t} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2-9}$$

A felület normal vektora ebben a pontban $\underline{N}$:

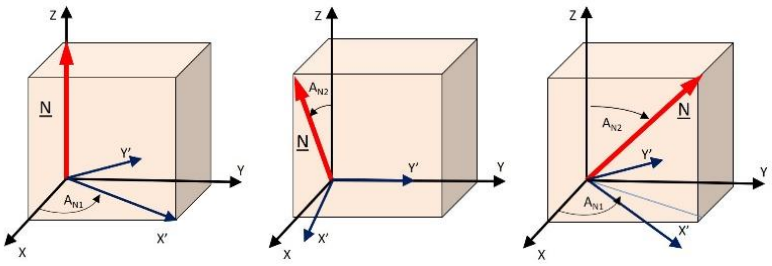
$$\underline{N} = \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2-10}$$



17. ábra A dolgozó átmérőt meghatározó pontok.

A felület normál vektora alapján számolható két elforgatási szög megadja a két tengely menti elforgatást (18. ábra), mely segítségével meghatározható az a transzformációs mátrix, mely megadja a metszeti kör egyenletét. A transzformációs mátrix:

$$\overline{\overline{Tr}} = \begin{bmatrix} cos(A_{N1}) \cdot cos(A_{N2}) & -sin(A_{N1}) & -cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) & R \cdot cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \\ sin(A_{N1}) \cdot cos(A_{N2}) 0 & cos(A_{N1}) & -sin(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) & -R \cdot cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \\ sin(A_{N2}) & 0 & cos(A_{N2}) & R \cdot \left(1 - cos(A_{N2})\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2-11}$$

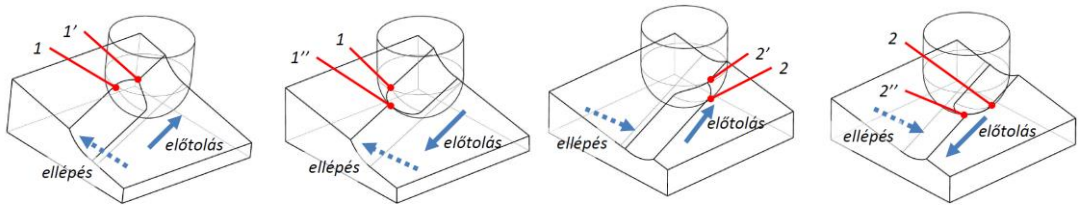


18. ábra Sík általános helyzetének megadása AN1 és AN2 szögekkel.

A transzformált kör egyenlete:

$$\overline{C_{eff}^{T}} = \begin{bmatrix} cos(A_{N1}) \cdot cos(A_{N2}) \cdot R_{eff} \cdot cos(2\pi t) - sin(A_{N1}) \cdot R_{eff} \cdot sin(2\pi t) - cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \cdot a_p + R \cdot cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \\ sin(A_{N1}) \cdot cos(A_{N2}) \cdot R_{eff} \cdot cos(2\pi t) + cos(A_{N1}) \cdot R_{eff} \cdot sin(2\pi t) - sin(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \cdot a_p - R \cdot cos(A_{N1}) \cdot sin(A_{N2}) \\ sin(A_{N2}) \cdot R_{eff} \cdot cos(2\pi t) + cos(A_{N2}) \cdot a_p + R \cdot (1 - cos(A_{N2})) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2-12}$$

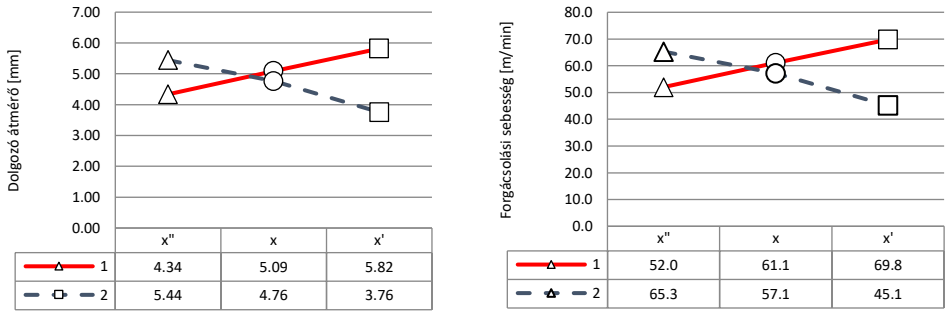
A dolgozó átmérőt ezen a görbén az előtolás iránya jelöli ki: az előtolással párhuzamos érintő érintési pontja és a szerszám középpontjának távolsága határozza meg.



19. ábra A dolgozó átmérőt meghatározó pontok.

Két érintőt kell figyelembe venni, és a fogásszélesség (oldallépés) irányának függvényében a 1 vagy a 2 pont az aktuális. Az előtolás irányának függvényében további 2-2 pont határozható meg, melyek a belépő illetve kilépő ponton adja meg a dolgozó átmérőt (19. ábra). Ebből következik, hogy a forgácsleválasztás során is változik a dolgozó átmérő és így a forgácsolási sebesség. A jelenlegi megoldásban [9] iterációs algoritmussal határoztam meg a pontok helyét.

A 20. ábra AN1=35°, AN2=25° és A=30° esetén mutatja a dolgozó átmérő és a forgácsolási sebesség változását D=10 mm, a_p=0.2 mm és a_e=0.1 mm esetén.



20. ábra A dolgozó átmérő és a forgácsolási sebesség változása.

A kutatás további feladata egy egyszerűbben meghatározható számítási módszer megtalálása, és a dolgozó átmérő felhasználása a technológia optimalizálására, például új szerszámpálya tervezési algoritmus során.

2.4 Tömbelektródás szikraforgácsolás vizsgálata

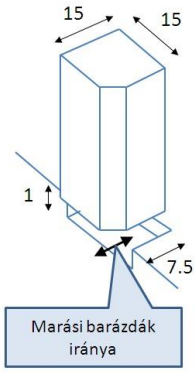
A tömbelektródás szikraforgácsolás a szabad formájú felületek előállításának gyakran alkalmazott technológiája, különösen a fröccsöntő szerszámgyártásban. A forgács leválasztása elektromos szikra segítségével történik, mely egy szigetelő folyadékba merülő elektróda és a munkadarab között jön létre. Az eljárás előnye, hogy bármilyen elektromosan vezető anyag szikraforgácsolható, az anyag keménysége nem jelent korlátot, a forgácsleválasztás során jelentősebb erőhatás nem jön létre. Az elektróda anyaga leggyakrabban réz illetve grafit, de más elektróda anyagok is használatosak (volfram, ezüst, grafitréz) [Ho2003][Maj2009].

A szikraforgácsolás során az elektróda geometriáját másoljuk a munkadarabra. A kialakuló felület jellege alapvetően eltér a forgácsolással kialakuló felülettől, ahol a szerszám mozgásából adódó nyomok geometrikus mintázatot alakítanak ki, míg szikraforgácsolás során rendezetlen helyzetű kráterek sorozata hozza létre a felület mintázatát. A felület jellege függ a folyamat paramétereitől (feszültség, áramerősség, frekvencia stb.), az elektróda anyagminőségétől, az elektróda és a munkadarab közötti távolságtól (szikraköz), valamint az elektróda felületi minőségétől [Mut2015].

A kutatás célja megállapítani az elektróda felületi érdességének hatását a szikraforgácsolás idejére, a kialakuló geometria pontosságára, a felület érdességére és az elektróda kopására.

A szikraforgácsolás során három paramétert változtattunk (1) az elektróda felületi érdességét, (2) a kialakítandó felület tervezett érdességét (és ezzel a szikraforgácsolási paramétereket) valamint (3) a szikraköz értéke [4][7].

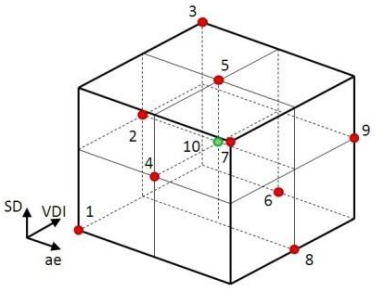
A szikraforgácsolás során 15x15 mm méretű réz elektródát használtunk (Meusburger, 2.0060), 7.5 mm széles 1 mm mély lépcső (21. ábra) szikrázására egy Ingersol Gantry 400 tömbelektródás szikraforgácsoló géppel. A szikraforgácsolási folyamat paramétereit a gép vezérlésének ajánlása alapján állítottuk be. A teszt darab 1.2343 (x38CrMoV5-1), 52-54 HRc keménységre edzett, köszörült felületű meleg munka acél volt.



21. ábra A vizsgálat geometria jellemzői

Taguchi terv

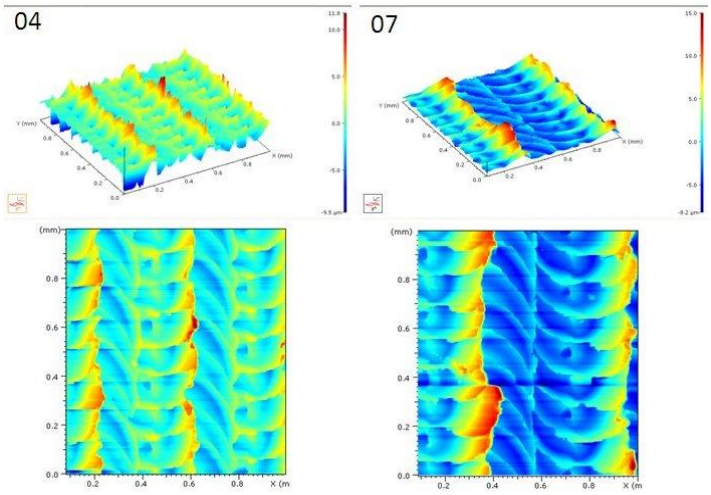
	ae	VDI	SD
1	0,1	18	0,2
2	0,1	21	0,25
3	0,1	24	0,3
4	0,2	18	0,25
5	0,2	21	0,3
6	0,2	24	0,2
7	0,3	18	0,3
8	0,3	21	0,2
9	0,3	24	0,25
10	0,2	21	0,25



22. ábra Kutatási terv szikraforgácsolt felületek vizsgálatához

A különböző elektróda felületi érdességeket marással állítottuk elő (D=10 mm; v_c = 250 m/min; n = 8000 1/min; v_f = 2000 mm/min). A munkadarab elvárt érdességét VDI 3400 ajánlás szerint adtuk meg, a fröccsöntő szerszámgyártásban jelentkező általános elvárások alapján. Az elektróda marás oldallépését (a_e), a szikraforgácsolt felület érdességét (VDI 3400 szerint) és a szikraközt (SD) 3-3 szinten definiáltuk. A kísérletek számának optimalizálása érdekében Taguchi kísérlet tervet alkalmaztunk (22. ábra).

A 3D topológiai képek (23. ábra) 1x1 mm-es felületén jól látszanak a barázdák és a fogankénti előtolás nyomai is, valamint jól látszik a váltakozó irányú (zig-zag) marás nyoma, ami minden második barázdacsúcsot eltüntetett.

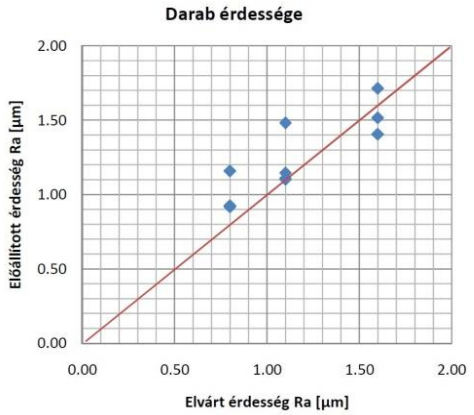


23. ábra A mart elektróda felületek 3D topológiai képei (4. és 7. elektróda)

No	a_e [mm]	Ra_E [µm]	Rz_E [µm]
1-3	0.1	1.4	7.2
4-6, 10	0.2	1.6	8.8
7-9	0.3	2.3	12.5

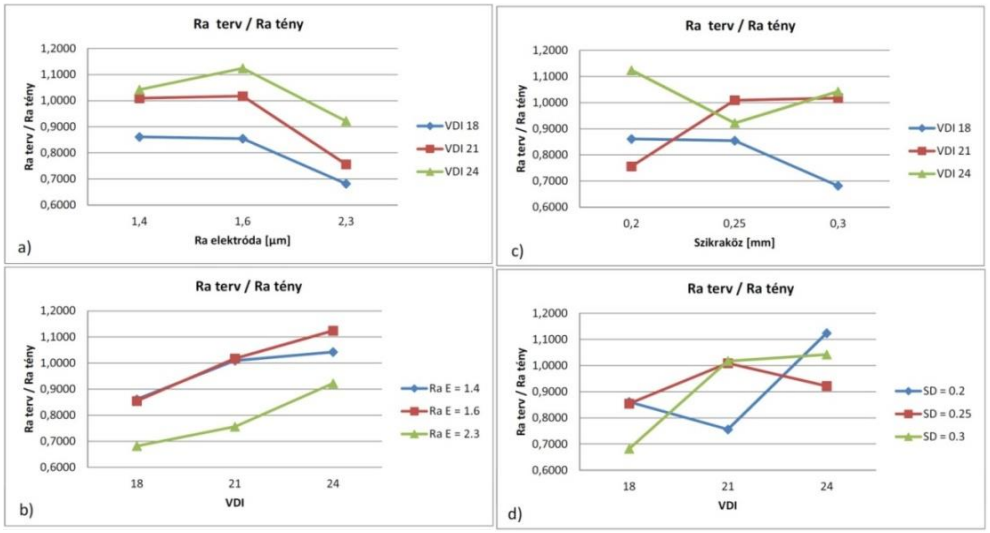
24. ábra Az elektródák felületi érdességének átlagai

A szikraforgácsolt lépcsők felületi érdesség értékeit a tervezett érdességi értékekkel hasonlítottuk össze. A 25. ábra 45°-os piros egyenes azt mutatja, hogy hova kéne esnie a mért értékeknek ideális esetben. A tervezett és a megvalósult érdesség arányát mutatja a 26. ábra több paraméter szerint.



25. ábra A tervezett és a megvalósult felületi érdesség (Ra)

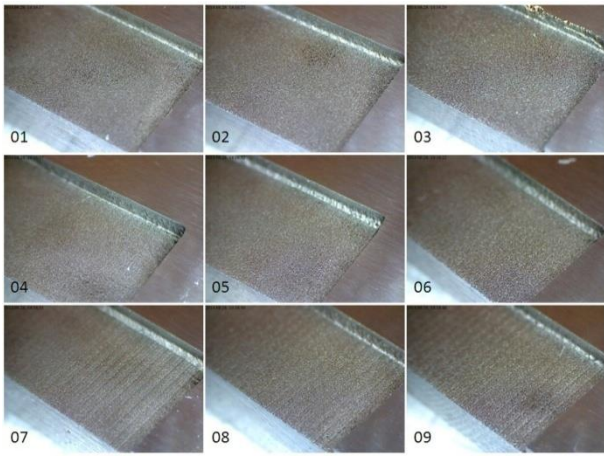
A diagramokból kitűnik, hogy a durva elektróda felület rontja a létrejövő felület minőségét (a) és b) diagram). A két kisebb elektróda érdesség között nincs különbség a vizsgált szempontból (a) és b) diagram). A kis szikraköz (0.2) csak a finom felület előállítása esetén kedvező, a nagy szikraköz (0.3) csak a két durvább felület (VDI 21, 24) esetén ad megfelelő eredményt (c) diagram).



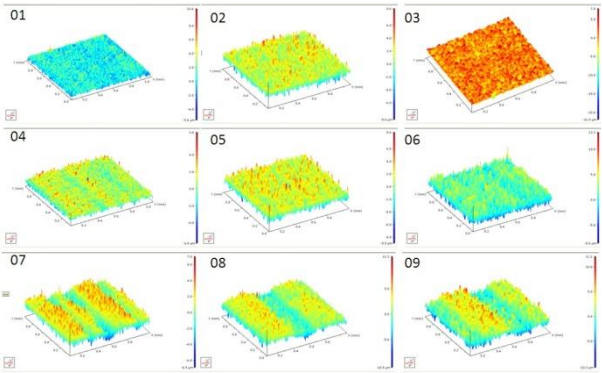
26. ábra a tervezett és a létrejövő érdesség (Ra) aránya

A szikraforgácsolt felületek fényképei (27. ábra) alapján megállapítható, hogy kis és közepes elektróda érdesség esetén a felület homogén, azonban nagy érdesség esetén az elektróda barázda mintázata megjelent a szikraforgácsolt felületen.

A 3D topológiai vizsgálata (28. ábra) alapján azonban megállapítható, hogy az Ra 1.4 µm elektródával készült felületek homogének, a többin megfigyelhető az átmásolódott mintázat. A nagyobb szikraköz javítja a felület homogenitását. A topológián jól megfigyelhető a szikraforgácsolt felületekre jellemző tűszerű kiemelkedések rendezetlen sora a felületen.



27. ábra A szikraforgácsolt felületek fényképe



28. ábra A szikraforgácsolt felületek 3D topológiája

Réz elektródákkal végzett kísérletek alapján bemutattuk, hogy a folyamat paraméterek mellett az elektróda felületi érdessége is hatással van a megmunkált felület minőségére. Az elektróda érdessége befolyásolta a megmunkálási program hatását, az érdesség eltért a tervezettől. Ez az eltérés akár szabad szemmel is jól látható. A szikraköz értékének növelése javította a felület homogenitását, de rontotta az érdesség értékét, a tervezettől való eltérés nagyobb lett.

2.5 Tézisek

1. Tézis Forgácsolási kísérletekkel kimutattam a gömbvégű maróval végzett felületmarás esetén a forgácsolási sebesség befolyásoló hatását, ami azonban a felület jellege miatt folyamatosan változhat a gömbvégű maró szerszám dolgozó átmerőjének változása miatt. [1][3][4][6][7]

2. Tézis Kidolgoztam gömbvégű maróval végzett felületmarás esetére a barázda magasság számításának geometriai modelljét a felületet lokálisan síkkal közelítve, mely figyelembe veszi a felület helyzetét és az előtolás irányát. [1]

3. Tézis Kidolgoztam gömbvégű maróval történő marás esetén a dolgozó átmérő számításának geometriai modelljét lokálisan síkkal közelítve a felületet, mely figyelembe veszi a felület helyzetét és a marás során alkalmazott előtolás és pásztázás irányát. [9]

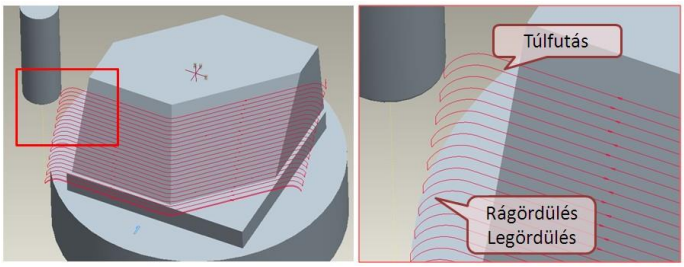
4. Tézis Réz elektródával végzett tömbelektródás szikraforgácsolási kísérletek alapján megállapítottam, hogy a szikraforgácsolási folyamat paraméterek mellett az elektróda felületi érdessége is hatással van a megmunkált felület minőségére. Az elektróda érdessége befolyásolja a megmunkálási program hatását, az érdesség eltért a tervezettől. A szikraköz értékének növelése javítja a felület homogenitását, de rontja az érdesség értékét, a tervezettől való eltérés nagyobb lett. [4][7]

3. Teraszoló kontúrmarás eljárás vizsgálata

Teraszoló kontúrmarás esetén a szerszám tengelyét jelentő z koordináta tengelyre merőleges síkban történik a megmunkálás nyitott vagy zárt kontúr megmunkálásával. A befejezett kontúrmarás után egy újabb szinttel folytatódik a megmunkálás.

Technológiai szempontból a forgácsolási folyamatot a következő paraméterek határozzák meg:

- szerszám: átmérő, sarokrádiusz, fogszám, anyag, bevonat, élgeometria.
- technológia: forgácsolási sebesség, fogankénti előtolás, előtolási sebesség, fogásmélység.
- szerszámpálya: marás iránya, túlfutás, legördülés és rágördülés (29. ábra).



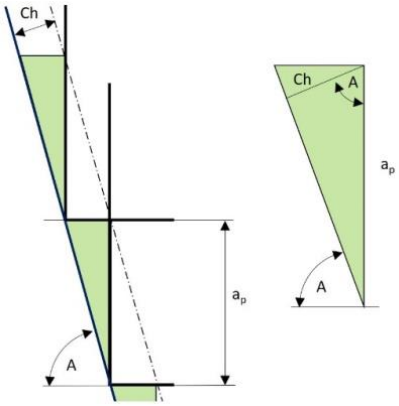
29. ábra Teraszoló kontúrmarás CAM szimulációja

3.1 Az érdesség geometriai vizsgálata

A felületi érdességet a geometriai megközelítés alapján a megmunkált felület barázdamagasságával lehet közelíteni. A barázdamagasság fontos paraméter, amely egyesíti a szerszám, a felület és a szerszámpálya geometriai paramétereinek hatását. Biztosítja a felületi érdesség pontosabb becslését, de önmagában nem alkalmas a felület érdességének becslésére. A barázdamagasság pontos kiszámításához a geometriai viszonyok körültekintő elemzése szükséges. Különböző szerszámgeometriák, a felület dőlése és a szerszámparaméterek aránya (R, c) és a szerszámpálya-paraméter (a_p, a_e) esetén a leíró egyenletek megváltozhat.

Ha a maró szerszám sarok rádiusza 0, a barázdamagasság a derékszögű háromszög magassága (30. ábra):

$$\mathrm{Ch} = a_p \cdot \cos(A) \tag{3-1}$$



30. ábra Barázda magasság sarokrádiuszos (R=0) marószerszám esetén

Általában a szerszámgyártók a szerszám sarkát kis méretű letöréssel látják el a nagyobb élstabilitás és kopásállóság érdekében. Ebben az esetben a geometriai modell bonyolultabb, és más geometriai állapotot kell felvázolni. Ha a szerszám sarokletörése kisebb, mint a fogásmélység ($c < a_p$), és a felület dőlése nagyobb, mint egy kritikus ($A > A^*$) érték (lásd később), a 31. ábra alapján az elméleti csúcsmagasság:

$$\mathrm{Ch} = \mathrm{I} - \mathrm{II} - \mathrm{III} \tag{3-2}$$

ahol

$$\mathrm{I} = c \cdot \sin(A) \tag{3-3}$$

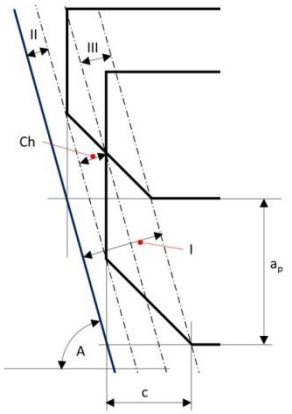
$$\mathrm{II} = c \cdot \sin(90° - A) = c \cdot \cos(A) \tag{3-4}$$

$$\mathrm{III} = \sin(A - 45°) \cdot \sqrt{2 \cdot \left(c - \frac{a_p}{\mathrm{tg}(A)}\right)^2} \tag{3-5}$$

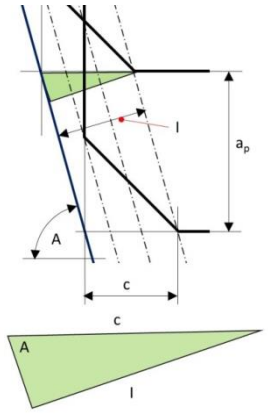
$$\mathrm{Ch} = c \cdot (\sin(A) - \cos(A)) \ - \sin(A - 45°) \cdot \sqrt{2 \cdot \left(c - \frac{a_p}{\mathrm{tg}(A)}\right)^2} \tag{3-6}$$

A kritikus hajlás esetén a fogásmélység (a_p) megegyezik a sarok letörésével. Ezt a kritikus álláspontot az a_p és c paraméterek határozzák meg (31. ábra d):

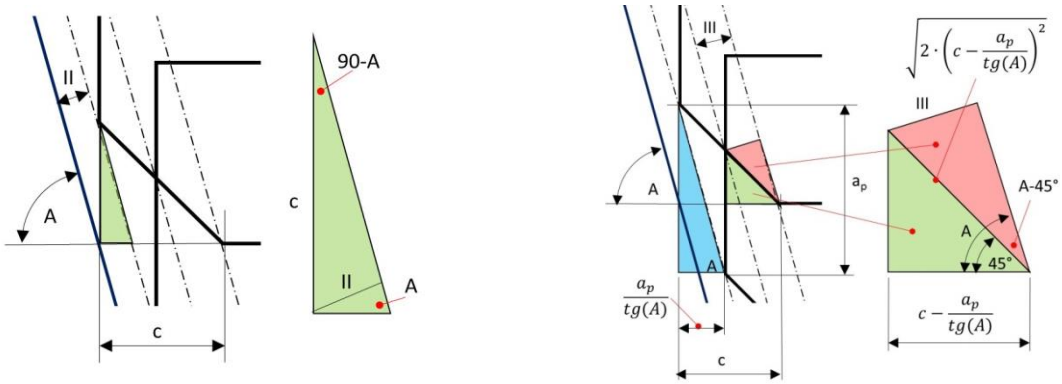
$$c = \frac{a_p}{\mathrm{tg}(A^*)} \ \rightarrow \ A^* = \mathrm{arctg}\left(\frac{a_p}{c}\right) \tag{3-7}$$



a) Koncepció



b) I. rész



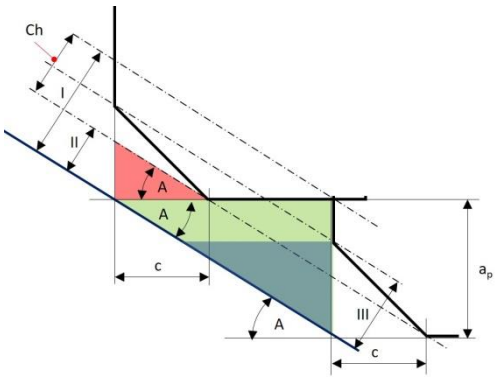
c) II rész *d) III rész*

31. ábra Barázda magasság ap> c, és A> A esetén*

Ha $a_p > c$, és $A < A^*$, a barázda magasság (32. ábra):

$$\mathrm{Ch} = \mathrm{I} - \mathrm{MIN}(\mathrm{II}; \mathrm{III}) \tag{3-8}$$

$$\mathrm{Ch} = \mathrm{a_p} \cdot \cos(\mathrm{A}) - \mathrm{c} \cdot \mathrm{MIN}(\sin(\mathrm{A})\,; \cos(\mathrm{A})) \tag{3-9}$$



32. ábra Barázda magasság a_p> c, és A<A esetén*

A felület meredekségétől függően a II. vagy a III. részt kell használni a számítás során. Az 32. ábra esetében a II. rész kisebb, mint a III., ezért azt kell használni. A kritikus hajlásszög meghatározható, de eltér az A*-tól. Ez az érték megegyezik a letörés szögével, amely 45°. R > 0 szerszám sarok rádiusza esetén a csúcsmagasság különböző egyenletekkel írható le az R és a_p arányának és a kritikus dőlésszögének (A*) függvényében. A kritikus hajlásszög felett a maró hengeres része is működik, nemcsak a radiális szakasz. Ha A < A * és R > a_p, a csúcsmagasság (33. ábra):

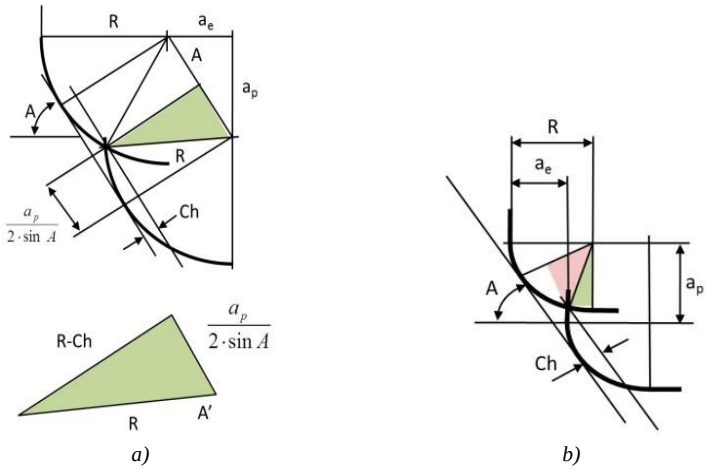
$$\mathrm{Ch} = \mathrm{R} \cdot \left(1 - \sin\left(\arccos\left(\frac{\mathrm{a_p}}{2\cdot\mathrm{R}\cdot\sin(\mathrm{A})}\right)\right)\right) \tag{3-10}$$

Ha A > A* a barázda magasság:

$$\mathrm{Ch} = \mathrm{R} \cdot \left(1 - \cos\left(\mathrm{A} - \arcsin\left(1 - \frac{\mathrm{a_p}}{\mathrm{R}\cdot\mathrm{tg}(\mathrm{A})}\right)\right)\right) \tag{3-11}$$

A kritikus hajlás, ahol a szerszám hengeres része elkezd dolgozni, a következő:

$$A^* = \frac{\arccos\left(\frac{a_p}{R}\right)+90°}{2} \tag{3-12}$$

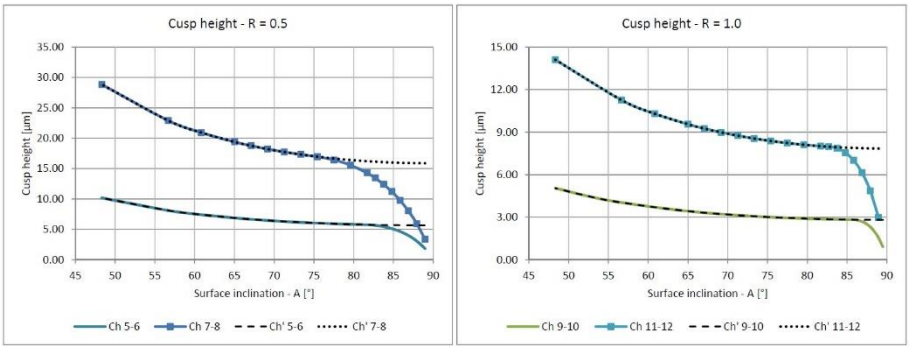


a) *b)*

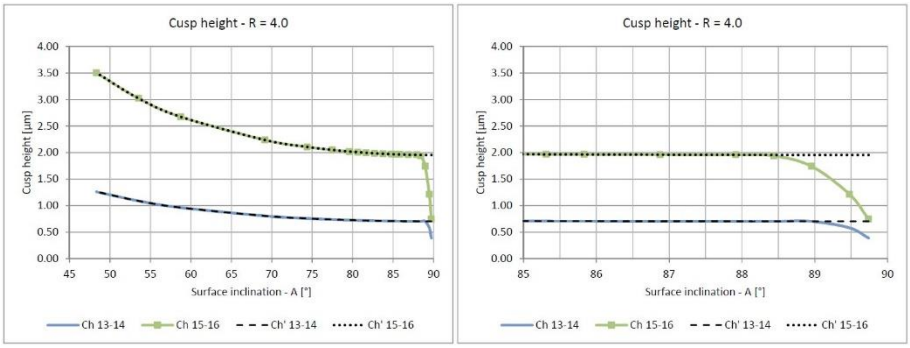
33. ábra Barázda magasság gömbvégű maró esetén a) $R>a_p$ b) $R<a_p$

A csúcsmagasság bemutatott geometriai modelljének vizsgálata megmutatja a szerszámgeometria (letörés és sugár) hatását. A bemutatott paraméterek a forgácsolási kísérlet adataival egyeznek meg (3.2.1 fejezet).

Sarokrádiuszos maró és gömbvégű maró esetén az eltérés az eredeti modelltől csak a meredek szakaszon látható (34. ábra). A Ch az új elmélet eredményét, a Ch' az eredeti geometriai megközelítést mutatja. A csúcsmagasság csökkenése jelentős a kritikus hajlásszög felett.



a) R = 0.5 mm, a_{p5-6} = 0.15 mm a_{p7-8} = 0.25 mm *b) R = 1.0 mm, a_{p9-10} = 0.15 mm a_{p11-12} = 0.25 mm*



c) R = 4.0 mm, a_{p13-14} = 0.15 mm a_{p15-16} = 0.25 mm *d) R = 4.0 mm, A > 85°*

34. ábra Elméleti barázda magasság rádiuszos szerszámok esetén.

3.2 Felületi érdesség technológiai vizsgálatai

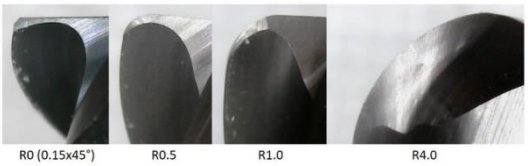
Mint az előző részből kiderül, tisztán geometriai paraméterek segítségével nem lehet pontos becslést adni a megmunkálás során kialakuló felületi érdességre, ezért szükséges egyéb tényezők hatásának vizsgálata is. A felületi érdesség becslésének kísérletekre épülő megközelítése alapján vizsgálható tényezők hatása. A következőkben több kísérlet eredményeit mutatom be.

A forgácsolási kísérletek Mazak 410A-II CNC megmunkáló központot használtunk, a szükséges megmunkáló programokat ProEngineer WF4 illetve CATIA v5 CAM rendszer generáltuk. A felületi érdességet Mitutoyo SJ-301 kontakt érdesség mérő műszerrel mértük. A felületi érdesség kontakt típusú mérése a mérőfej szűrő hatása miatt nem képes beolvasni a valós profilt, de ezt a módszert alkalmazzák a leggyakrabban az iparban. Az érdességmérés során az Rz felületi érdességi paramétert mértük és hasonlítottuk össze a barázda magassággal. Az Rz paraméter öt csúcs és völgy közötti távolság átlaga, és meghatározása közel áll a csúcsmagasság meghatározásához. A Ra átlagos érdesség paraméter a leggyakrabban használt érdességi paraméter az iparban, de elrejti a csúcsok és völgyek jellegét. A mérési eredményeket Minitab v14 és MS Excel szoftverekkel végeztük.

3.2.1 A teraszoló kontúrmarás csúcsmagasságának kísérleti igazolása

A következőkben a bemutatott elméletet, a kritikus felület hajlásszög létezését igazoló kísérletek eredményét ismertetem. Négy marót választottunk ki a Fraisa SA kínálatából tesztgyártás céljából. A szerszámok átmérője 8 mm; a sarok rádiusza 0, 0,5, 1,0 és 4,0 mm (35. ábra). A hivatalosan R = 0 eszköz sarka 0,15x45°-os letöréssel rendelkezik

No	Szerszám	D [mm]	R [mm]	z [-]
1	P5355.391	8	0.0	4
2	U45319.388	8	0.5	4
3	U45319.391	8	1.0	4
4	U5286.391	8	4.0	2



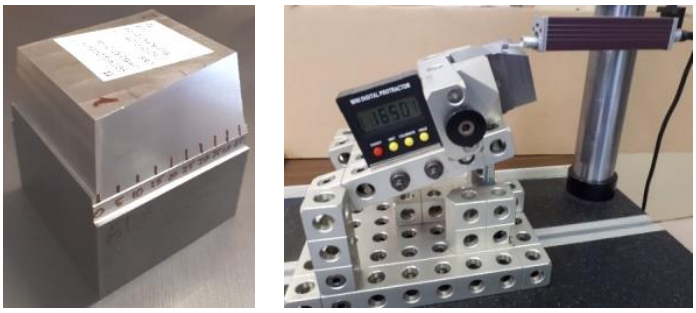
35. ábra Kísérleti szerszámok adatai

A csúcsmagasságot a fogásmélység (a_p) befolyásolja, ezért két a_p szintet alkalmaztunk (0.15 és 0.25 mm). A forgácsolási sebesség (v_c = 160 m / perc) és a fogankénti előtolás (f_z = 0.05 mm) megegyezett ebben a vizsgálat sorozatban. A paramétereket a szerszámgyártó ajánlása alapján határoztuk meg. A teljes faktoriális kísérlet tervet, 16 különböző beállítást az 5. táblázat mutatja. A teszt darabok C45 közepes széntartalmú acélból készültek (W.Nr. 1.0503, Rm = 630-780 MPa), a megmunkált felület mérete 50x20 mm volt (36. ábra).

5. táblázat Kísérleti beállítások csúcsmagasság vizsgálatához.

No	R [mm]	a_p [mm]	Marási irány	A* [°]	A_{min} [°]
1	0.0	0.15	Egyen	45	70
2	0.0	0.15	Zig-zag	45	70
3	0.0	0.25	Egyen	59	70
4	0.0	0.25	Zig-zag	59	70
5	0.5	0.15	Egyen	81.3	70
6	0.5	0.15	Zig-zag	81.3	70
7	0.5	0.25	Egyen	75.0	70
8	0.5	0.25	Zig-zag	75.0	70
9	1.0	0.15	Egyen	85.7	80
10	1.0	0.15	Zig-zag	85.7	80
11	1.0	0.25	Egyen	82.8	70
12	1.0	0.25	Zig-zag	82.8	70
13	4.0	0.15	Egyen	88.9	85
14	4.0	0.15	Zig-zag	88.9	85
15	4.0	0.25	Egyen	88.2	85
16	4.0	0.25	Zig-zag	88.2	85

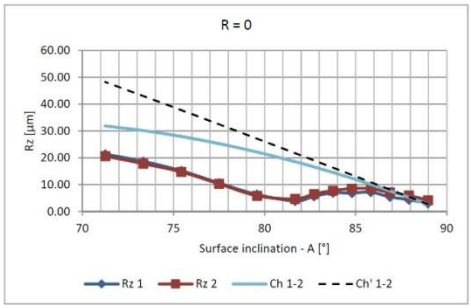
A kritikus hajlásszög jobb észlelése érdekében a tesztfelület dőlése 90°-ról 85°-ra, 80 -ra vagy 70°-ra (A_{min}) között változott, a kritikus hajlásszögtől (A*) függően. A 5. táblázat a kísérleti felületek dőlésszögeinek értékeit is mutatja. A pontos érdesség mérés érdekében a felületi szakasz vízszintes helyzetét be kellett állítani. Egy speciális készülék biztosította ezt a megfelelő helyzetet (36. ábra). A felületi érdességet 13 helyzetben mértük, háromszor különböző szinteken.



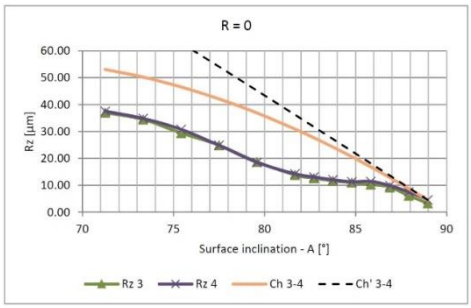
a) *b)*

36. ábra Egy teszt darab (a) és a mérési elrendezés (b).

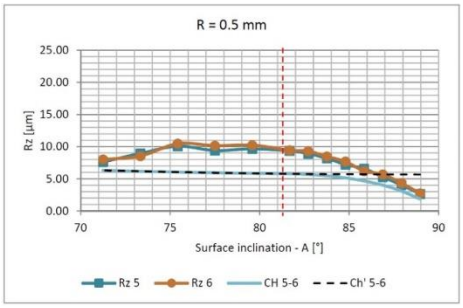
A mért felületi érdességi adatok hasonló jelleget mutatnak, mint a barázda magasság adatai (37. ábra). A szaggatott görbék az eredeti koncepció alapján mutatják a csúcsmagasság értékeket, a folytonos görbék pedig a módosított csúcsmagasság értékeket. R = 0 (37. ábra a-b) esetén a mért Rz értékek kisebbek, mint a csúcs magassága, ha R > 0 (37. ábra c-h), akkor az Rz értékek nagyobbak. A mért értékek minden esetben a módosított barázdamagasság adatokat követik, a kritikus dőlésszög érték figyelhető meg, de egy kicsit magasabb, majd a számított. Az élgeometria hatása lehet ennek oka.



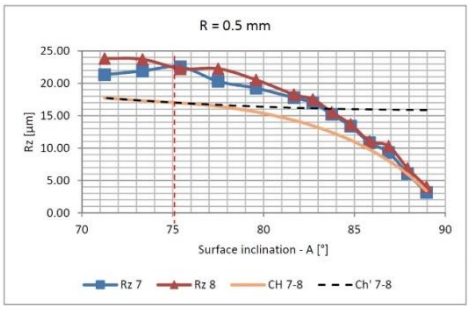
a) R = 0 mm; a_p = 0.15 mm



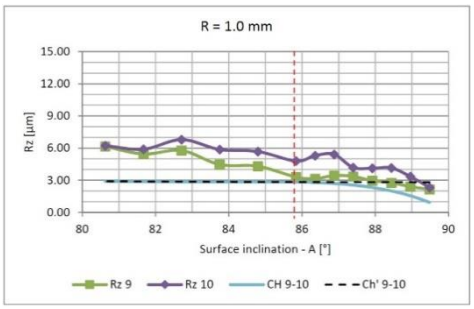
b) R = 0 mm; a_p = 0.25 mm



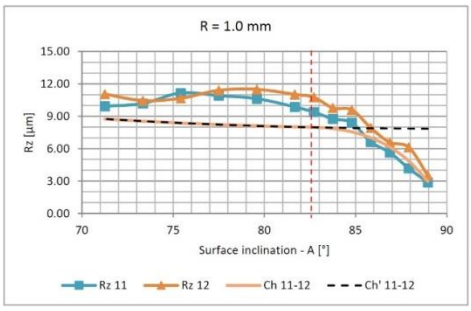
c) R = 0.5 mm; a_p = 0.15 mm



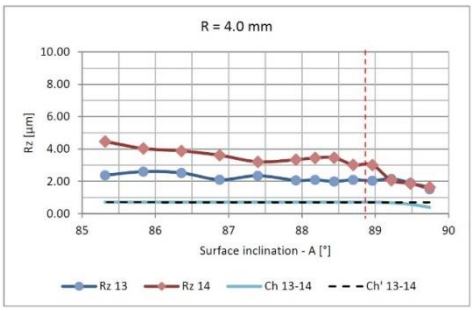
d) R = 0.5 mm; a_p = 0.25 mm



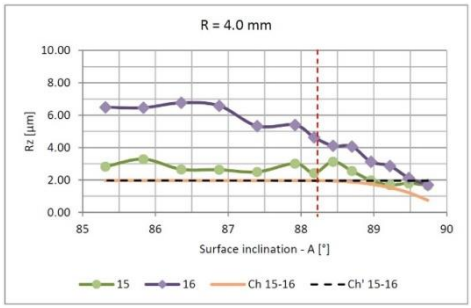
e) R = 1.0 mm; a_p = 0.15 mm



f) R = 1.0 mm; a_p = 0.25 mm



g) R = 4.0 mm; a_p = 0.15 mm

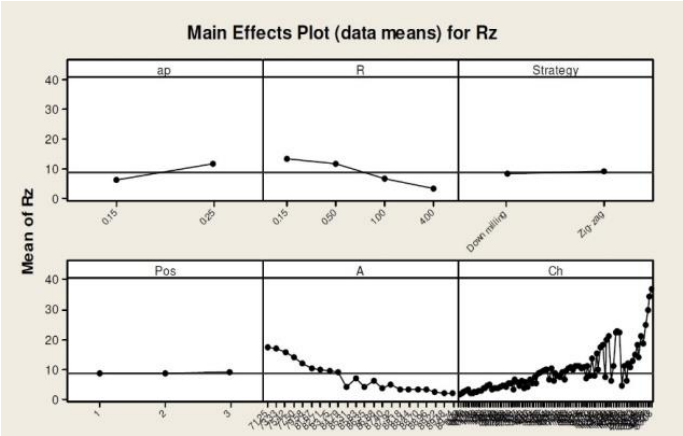


h) R = 4.0 mm; a_p = 0.25 mm

37. ábra A felületi érdesség mért értékei az egyes szerszámok esetén (A – felület meredekség).

A főhatás ábra (38. ábra) alapján az ismételt mérés különböző szinteken (Pos) való elhelyezkedése nem befolyásolta a felületi érdességet, így a megmunkált felület homogénnek tekinthető. A marási iránynak (Stratégia: egyenirányú marás vagy zig-zag marás) szintén nincs hatása, ezért a marási stratégia lényegtelen a felületi érdesség szempontjából. A zig-zag marás rövidebb időt vesz igénybe, ezért előnyösebb. A nagyobb fogásmélység növeli a felület érdességét, a nagyobb sarok sugara és a meredekebb felület csökkenti, de ezek az eredmények

megfelelnek a várakozásainknak. A szerszám sarokrádiusza hat a legnagyobb mértékben az érdességre.



38. ábra Felületi érdesség főhatás ábrái teraszoló kontúrmarás esetén.

A regressziós elemzéseket az eredeti 624 mért adat alapján végeztük. Ha a regresszióanalízis csak a csúcsmagasságot veszi figyelembe, az R^2(adj)[2], amely a regresszió pontosságát mutatja, 75.2%, tehát a csúcsmagasság kevéssé alkalmas önmagában a becslésre (Rz_1). A geometriai paraméterek hozzáadásával (Rz_2) a regresszió pontossága javul (R^2(adj) = 84.4%). A csúcsmagasság meghatározása azonban tartalmazza a geometriai paramétereket, ha csak a geometriai paramétereket vesszük figyelembe (Rz_3) Ch nélkül, az eredmény nagyon gyenge (R^2(adj) = 64.5%).

```
Rz_1 = 3.43 + 0.549 Ch
Predictor   Coef    SE Coef    T      P
Constant    3.4306  0.1857    18.47 0.000
Ch          0.54943 0.01264   43.46 0.000
S = 3.53232   R-Sq = 75.2%   R-Sq(adj) = 75.2%
```

```
Rz_2= 32.7 + 0.39 Ch + 30.2 ap - 0.16 R - 0.4 A
Predictor Coef      SE Coef       T      P
Constant  32.731    2.142      15.28  0.000
Ch         0.38934  0.01383    28.16  0.000
ap        30.176    2.398      12.58  0.000
R         -0.15711  0.09102    -1.73  0.085
A         -0.40420  0.02572   -15.72  0.000
S = 2.80167  R-Sq = 84.5%  R-Sq(adj) = 84.4%
```

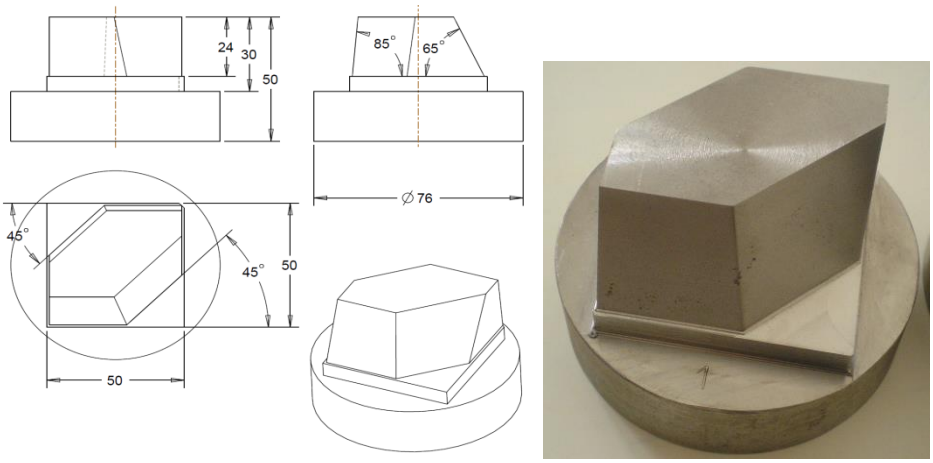
```
Rz_3 = 58.8 + 54.1 ap - 1.12 R - 0.714 A
Predictor  Coef      SE Coef     T      P
Constant   58.80     2.915     20.17  0.000
ap         54.080    3.385     15.98  0.000
R          -1.1201   0.1273    -8.80  0.000
A          -0.71446  0.03507  -20.37  0.000
S = 4.22780  R-Sq = 64.6%  R-Sq(adj) = 64.5%
```

[2] Korrigált többszörös determinációs együttható: A független változók szám, és a minta nagysága segítségével módosított R^2 érték, az alapsokaságra vonatkoztat. R^2: többszörös determinációs együttható, mely a modell magyarázóerejét mutatja.

A statisztikai elemzés eredményeit összegezve, a felületi érdesség megbecsülhető a csúcsmagasság, valamint a szerszám és a felület kiválasztott geometriai paraméterei alapján. A csúcsmagasság leírja a felületi érdesség változásának természetét, de más paraméterek is hatással vannak rá. Geometriai megközelítés esetén a felületi dőlés, a szerszám sarok sugara és a vágásmélység a befolyásoló paraméter.

3.2.2 Az előtolás hatásának vizsgálata

A kísérlet során 10 átmérőjű, 0.5 mm és 1.0 mm sarokrádiuszú, 6 élű (z = 6) marókkal (Fraisa U5252.445 és U5250.450) végeztünk kísérleteket [11]. A kísérlet célja előzetes vizsgálat volt, kimutatható-e az előtolás, mint technológiai paraméter hatása a geometriai paraméterek mellett. Állandó forgácsolási sebesség (v_c = 200 m/min; n = 6400 1/min) mellett különböző fogankéni előtolásokkal történt a forgácsolás, három különféle fogásmélységgel (a_p = 0.15 / 0.20 / 0.25 mm).



39. ábra A teszt darab geometriai kialakítása.

6. táblázat Kísérleti beállítások az előtolás hatásának vizsgálatára.

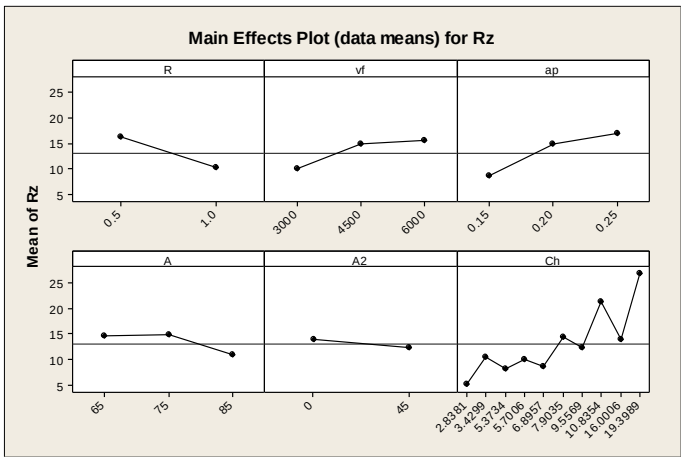
Darab	Felület	R [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	A [°]
1	1	0.5	3000	0.15	65
	2	0.5	6000	0.15	85
2	3	0.5	4500	0.20	75
	4	0.5	6000	0.25	65
3	5	0.5	3000	0.25	85
	6	1	6000	0.15	65
4	7	1	3000	0.15	85
	8	1	4500	0.20	75
5	9	1	3000	0.25	65
	10	1	6000	0.25	85

A teszt darabok S355 (W.Nr. 1.0045; Rm = 470-630 MPa) alacsony széntartalmú ötvözetlen szerkezeti acélból készültek, három féle felület meredekséggel (A = 65° / 75° / 85°). Minden

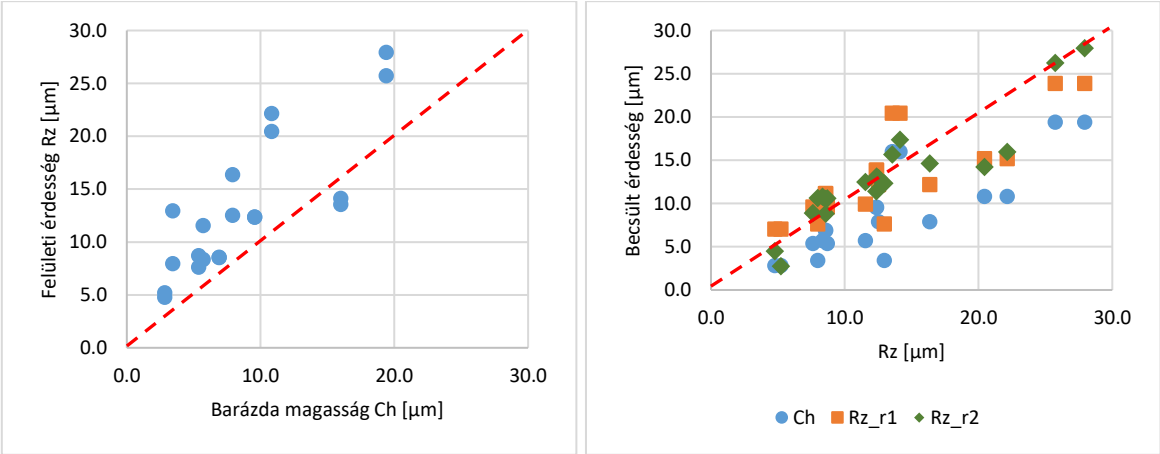
felület kétféle elhelyezkedéssel készült, az x iránnyal párhuzamosan és azzal 45°-ot bezárva (39. ábra). A nagyszámú kísérleti variáció miatt kísérlettervezési módszerrel csökkentettük a végrehajtandó beállítások számát, melyet a 6. táblázat mutat. A teszt felületeken Ra és Rz érdességi paramétert mértünk 3 helyen, ezek átlagát értékeltük ki.

A mért Rz érdességi adatok feldolgozásával nyert főhatás ábrák (40. ábra) azt mutatják, hogy az eddig vizsgált geometriai paraméterek (R, A, a_p) várt hatása mellett, az előtolás is jelentős hatást gyakorol az érdességre. E mellett érdekes eredmény, hogy a felület elhelyezkedése (A2) szintén befolyásolja a felület érdességét. A 45°-ban álló felületek érdessége egyértelműen kisebb. Ennek oka a kisebb rezgés, kedvezőbb rezgéscsillapítás lehet, mivel ebben az esetben mind az x, mind a y irányú előtoló hajtás dolgozik.

Mint látható, a barázda magasság szintén fontos paraméter, kisebb kilengésekkel, de követi az érdességet. Az érdesség Rz értéke általában nagyobb, mint a barázda magasság (41. ábra a).



40. ábra Felületi érdesség főhatás ábrái.



a) *b)*

41. ábra a) A felületi érdesség és a barázda magasság kapcsolata

b) A felületi érdesség különböző becslési eredményei.

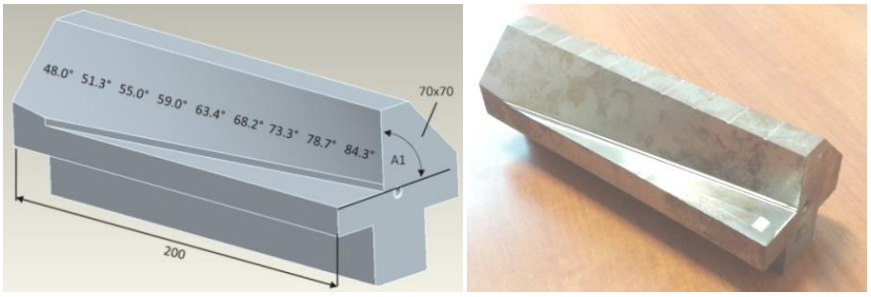
A regresszió analízis alapján szintén látható, hogy pusztán a barázda magasság (Ch) értékével az érdesség nem becsülhető. Amennyiben kiegészítjük a paraméterek listáját az előtolási sebességgel, a felület meredekségével és elhelyezkedésével, a regresszió pontossága javul.

Rz_r1 = 4.14 + 1.02 Ch	Rz_r2 = 5.31 + 0.979 Ch + 0.00173 vf - 0.104 A - 0.0381 A2
Predictor Coef SE Coef T P	Predictor Coef SE Coef T P
Constant 4.144 1.714 2.42 0.026	Constant 5.311 6.227 0.85 0.407
Ch 1.0178 0.1687 6.03 0.000	Ch 0.9790 0.1289 7.59 0.000
S = 3.84085 R-Sq = 66.9% R-Sq(adj) = 65.1%	vf 0.0017339 0.0004836 3.59 0.003
	A -0.10362 0.07335 -1.41 0.178
	A2 -0.03811 0.02883 -1.32 0.206
	S = 2.90052 R-Sq = 84.3% R-Sq(adj) = 80.1%

Mint az az ábrán (41. ábra b) is látható az Rz_r2 regresszió értékei jobban illeszkednek az ideális esetet jelző 45°-os egyeneshez.

3.2.3 Előtolás és marási irány vizsgálata

A második kísérlet sorozatban az előzővel megegyező D10/R1/z6 (Fraisa U5250.450) szerszámot használtam, a munkadarab anyag is megegyezett (S355 WNr. 1.0045). A teszt felület hajlásszöge 90° és 45° között folyamatosan változott (42. ábra), így ezen belül tetszőleges meredekség esetén mérhető a felületi érdesség. A vizsgálatok során az ábrán jelölt 9 pozícióban történt mérés [10][12].

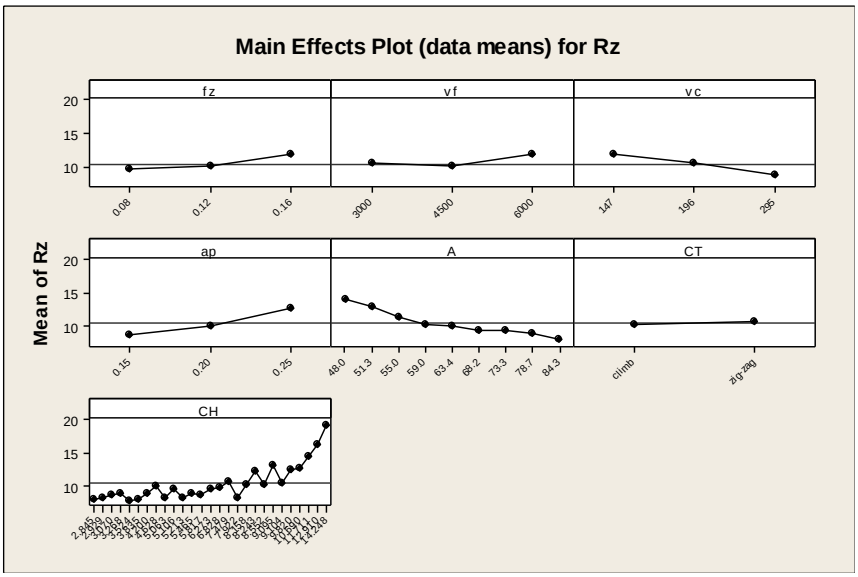


42. ábra A kísérleti darab geometriai kialakítása

A kísérlet során a fogásmélység 3 szinten változott (a_p = 0.15/0.20/0.25 mm); az előtolás szintén 3 szinten (f_z = 0.08/0.12/0.16 mm), valamint egyenirányú és zig-zag marási stratégiát is alkalmaztunk (CT). A kísérleti beállításokat részfaktoriális kísérlettervvel határoztuk meg. A kísérlet két részben történt. Az *A* fázis során állandó előtolási sebesség (v_f = 4500 mm/min) mellett, eltérő forgácsolási sebességekkel történt a forgácsolás, míg a *B* fázisban állandó forgácsolási sebesség (v_c = 196 m/min) és változó előtolási sebesség mellett. A két kísérlettervet a 7. táblázat mutatja.

7. táblázat Egyesített kísérleti beállítások az előtolás és a marási irány vizsgálatára teraszoló kontúrmarás esetén.

No	ap	fz	CT	vf [mm/min]	ap [mm]	fz [mm]	n [1/min]	vc [m/min]	CT
A1	-1	-1	+1	4500	0.15	0.08	9375	295	zig-zag
A2	+1	-1	-1	4500	0.25	0.08	9375	295	egyen ir.
A3	-1	+1	-1	4500	0.15	0.16	4688	147	egyen ir.
A4	+1	+1	+1	4500	0.25	0.16	4688	147	zig-zag
A5	0	0	-1	4500	0.20	0.12	6250	196	egyen ir.
A6	0	0	+1	4500	0.20	0.12	6250	196	zig-zag
B1	-1	-1	+1	3000	0.15	0.08	6250	196	zig-zag
B2	+1	-1	-1	3000	0.25	0.08	6250	196	egyen ir.
B3	-1	+1	-1	6000	0.15	0.16	6250	196	egyen ir.
B4	+1	+1	+1	6000	0.25	0.16	6250	196	zig-zag
B5	0	0	-1	4500	0.20	0.12	6250	196	egyen ir.
B6	0	0	+1	4500	0.20	0.12	6250	196	zig-zag



43. ábra A felületi érdesség főhatás ábrái.

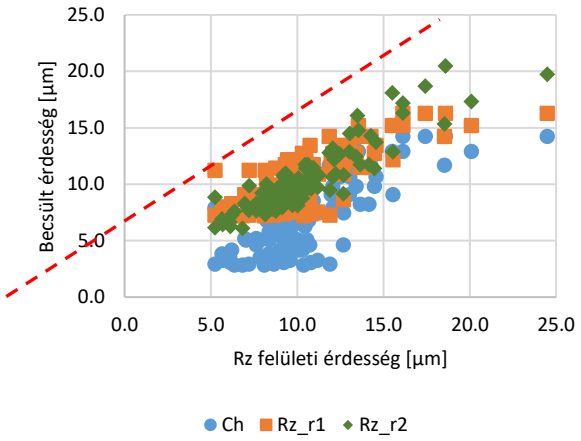
A 108 mérési adat alapján készült statisztikai kiértékelés azt mutatja (43. ábra), hogy a növekvő előtolás (f_z; v_f) növeli a felületi érdességet, a növekvő forgácsolási sebesség (v_c) viszont csökkenti. A geometriai paraméterek – fogásmélység (ap) és a felület hajlásszöge (A) – a korábbiakhoz hasonlóan viselkedtek, a fogásmélység növeli, a felület hajlásszöge csökkenti az érdességet. A marási irány – egyenirányú vagy zig-zag – nem gyakorolt hatást az érdességre. A barázda magasság (Ch) kapcsolata viszont itt is egyértelmű.

Az egyértelmű kapcsolat ellenére megállapítható, hogy csak a barázda magasság alapján nem lehet megfelelő becslést végezni, szükséges további paraméterek szerepeltetése a regressziós összefüggésben:

```
Rz_r1 = 4.95 + 0.795 Ch
Predictor     Coef     SE Coef      T      P
Constant    4.9522     0.4791    10.34  0.000
Ch          0.79526    0.06342   12.54  0.000
S = 2.04409   R-Sq = 59.7%   R-Sq(adj) = 59.4%
```

```
Rz_r2 = 13.7 - 39.6 ap + 13.0 fz - 0.0153 vc
+ 0.520 Ch + 0.0468 Ch2
Predictor   Coef      SE Coef      T      P
Constant     13.663    1.705     8.01   0.000
ap          -39.600    8.123    -4.88   0.000
fz           13.010    5.644     2.30   0.023
vc          -0.015277  0.004170 -3.66   0.000
Ch           0.5196    0.3086    1.68   0.095
Ch2          0.04676   0.01556   3.00   0.003
S = 1.39863   R-Sq = 81.9%   R-Sq(adj) = 81.0%
```

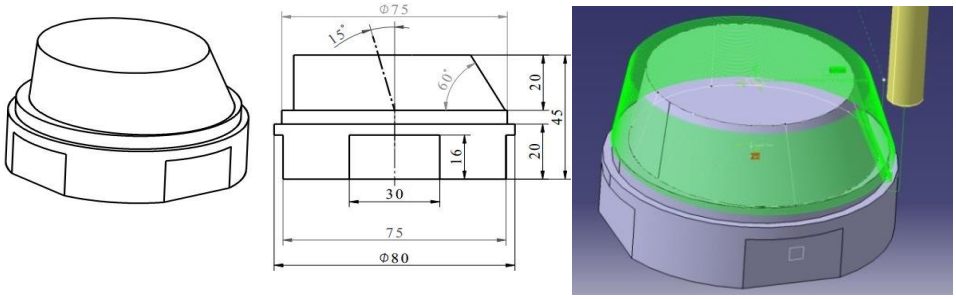
A barázda magasság és a két fenti regressziós összefüggés eredményét mutatja a 44. ábra. Mint látható, a barázda magasságok alul becsülik az érdességet, a szaggatott vonal alatt vannak az érdesség értékekhez tartozó barázda magasság értékek. Csak a barázda magasságot figyelembe vevő regresszió pontosabb becslést ad, de sok helyen látható jelentős eltérés. A forgácsolási paramétereket is tartalmazó regresszió jelentősen javítja a becslés pontosságát.



44. ábra A felületi érdesség különböző becslési eredményei.

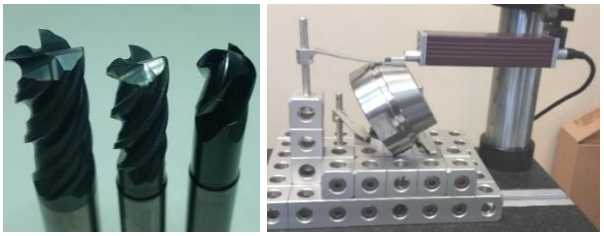
3.2.4 A felületmeredekség hatása

Az előző kísérletek során egyenes szerszámpálya mentén történt a megmunkálás. Ebben a kísérlet sorozatban íves szerszámpályákkal megmunkálható felületet vizsgáltam [13]. A munkadarab anyaga C45 közepes széntartalomú acél (WNr. 1.0503; Rm = 630-780 MPa). A geometriai kialakítását a 45. ábra mutatja. A felület hajlásszöge (A) 60° és 90° között változik. A kísérlet során három különböző szerszámot használtunk 0, 1 és 5 mm-es sarok rádiusszal (46. ábra a). A szerszámok típusa: Fraisa P15207.501, Fraisa P45319.450, Fraisa X7450.450, az átmérők 12 illetve 10-10 mm-esek voltak, a fogszám minden esetben z=4.



a) *b)*

45. ábra A teszt darab geometriája (a) és a szerszámpálya szimuláció (b).



a) *b)*

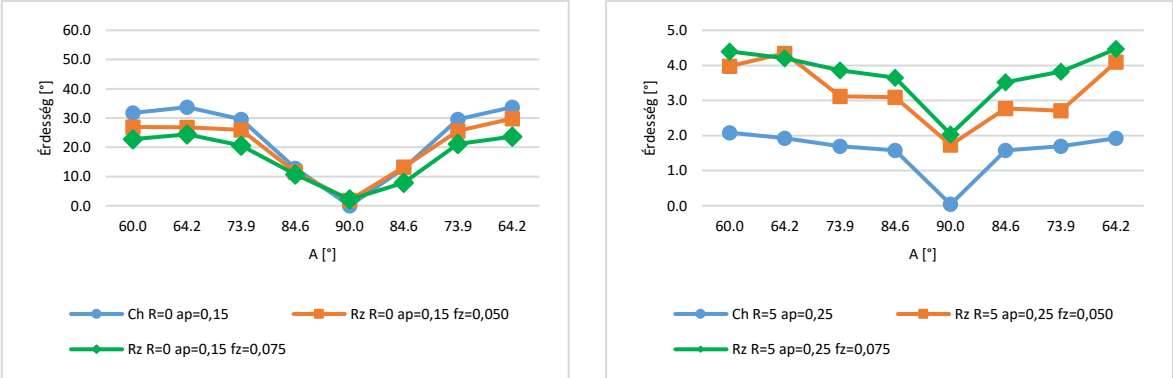
46. ábra Teszt szerszámok (a) és az érdesség mérés elrendezése (b).

A forgácsolási sebesség (v_c = 160 m/min) állandó volt, a fogankénti előtolást (f_z=0,050/0,075 mm) és a fogásmélységet két szinten vizsgáltuk (a_p = 0.15/0.25 mm). A 12 teszt darab beállításait az 8. táblázat mutatja.

8. táblázat Kísérlati beállítások teraszoló kontúrmarás vizsgálatára íves szerszámpálya mentén.

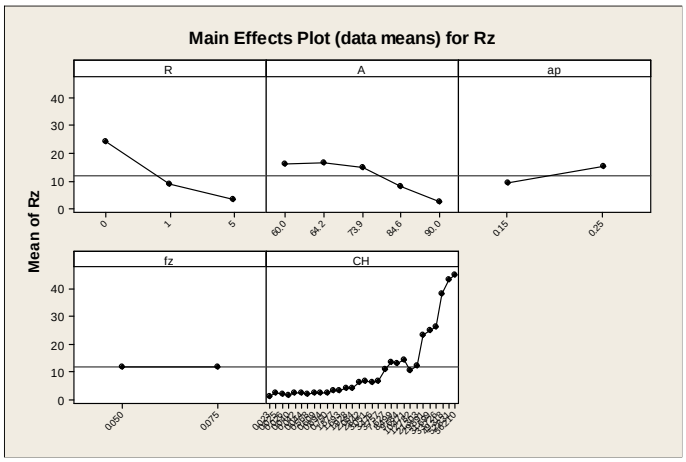
No	Szerszám	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm]
1	D12R0	160	0.15	0.050
2	D12R0	160	0.25	0.050
3	D10R1	160	0.15	0.050
4	D10R1	160	0.25	0.050
5	D10R5	160	0.15	0.050
6	D10R5	160	0.25	0.050
11	D12R0	160	0.15	0.075
12	D12R0	160	0.25	0.075
13	D10R1	160	0.15	0.075
14	D10R1	160	0.25	0.075
15	D10R5	160	0.15	0.075
16	D10R5	160	0.25	0.075

A mérési eredmények (47. ábra) azt mutatják, hogy az íves szerszámpálya esetén is érvényesülnek a geometriai paraméterek hatásai az érdességben. A függőleges szakasz (A = 90°) közelében mért jelentősen kisebb érdesség értékek vezettek el a kritikus hajlásszög felismeréséhez és a korábbi fejezetben bemutatott kombinált matematikai modell megalkotásához.



47. ábra Barázda magasság és a felületi érdesség (Rz) értékei (szemelvény).

A főhatás ábra (48. ábra) azt mutatja, hogy az előtolás ebben az esetben nem gyakorolt hatást az érdességre, a geometriai paraméterek hatása egyértelműeb kimutatható ez alapján is.



48. ábra A felületi érdesség főhatás ábrái.

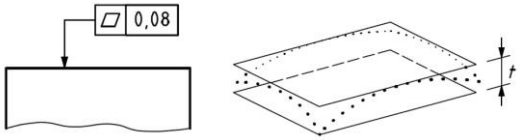
3.3 Tézisek

5. Tézis Kidolgoztam a barázda magasság geometriai modelljét teraszoló kontúrmarás esetére, mely figyelembe veszi a megmunkálás geometriai paramétereit, úgymint a szerszám sarok kialakítását, a fogásmélység értékét és a felület dőlésszögét. Elméleti modell alapján kimutattam a felület határ hajlásszögének létezését, mely eltérő geometriai modell alkalmazását teszi indokolttá, és forgácsolási kísérletekkel igazoltam ezt. [13]

6. Tézis Forgácsolási kísérletek alapján megállapítottam, hogy teraszoló kontúrmarás felületi érdességének becslése során nemcsak a geometriai paramétereket (R, A, a_p) kell figyelembe venni, hanem a forgácsolási paramétereket is (v_c, f_z) a pontosabb becslés érdekében. A marás iránya azonban nem gyakorol hatást az érdességre. Ezek figyelembevételével korrekciós tényező határozható meg az érdesség várt értékének pontosítására. [10][11][12][13]

4. Forgácsolt felületek makro geometriai vizsgálata

Kutatásaim során a síklapúság meghatározásával foglalkoztam. A síklapúság hiba definíciója: két egymással párhuzamos sík lap távolsága, melyek közrefogják a legyártott geometriai elemet (49. ábra). A tűrésmezőt alkotó két sík helyzete és orientációja tetszőleges a méret tűrésmezőn belül.



49. ábra Síklapúság rajzi jelölése és a tűrésmező [ISO1101].

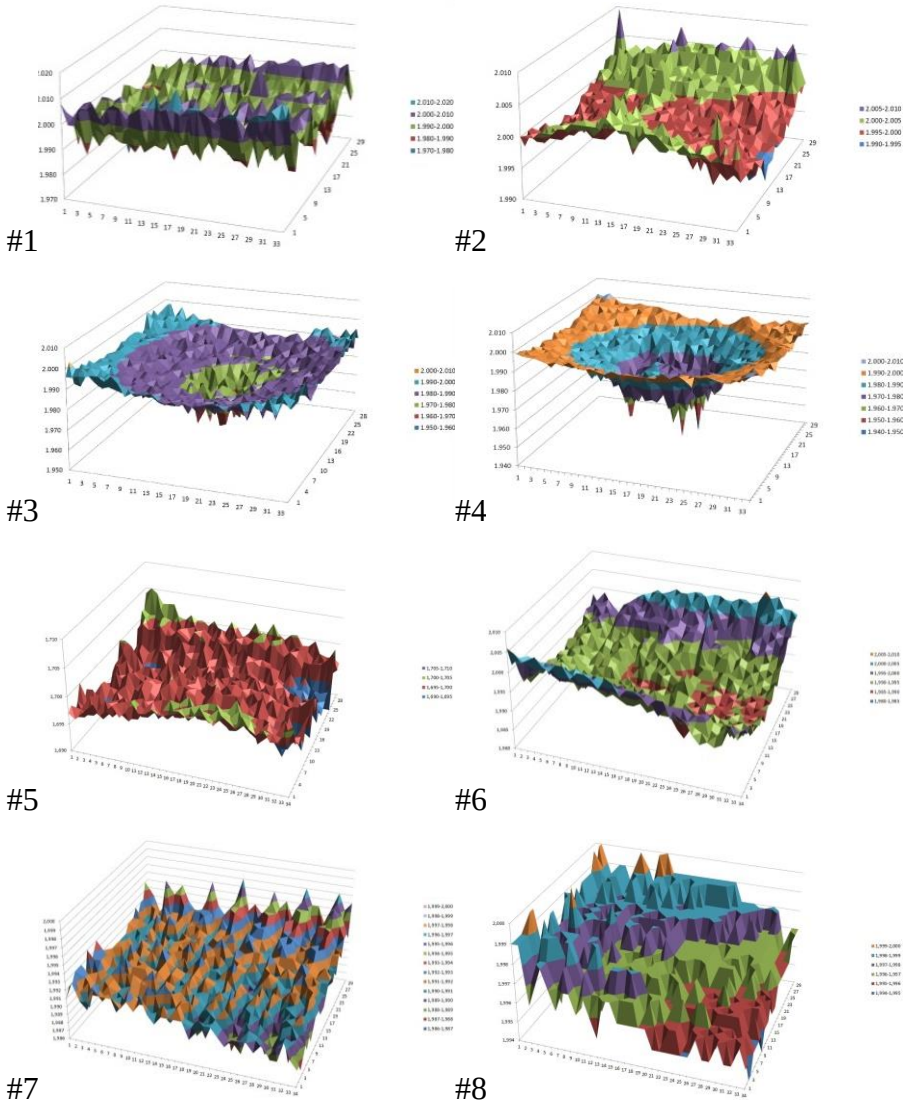
A síklapúsági hiba meghatározásával kapcsolatban a pontfelvételi stratégiákat vizsgáltam, hogyan hat a mért pontok száma és elhelyezkedése a hiba értékére és hogyan lehet ezt korrigálni. A kutatásmásik iránya a síklapúsági hiba meghatározási algoritmusának fejlesztése volt minimum zóna módszer esetén.

9. táblázat Teszt síkok megmunkálási paraméterei.

	Sf#1	**Sf#2**	**Sf#3**	**Sf#4**	**Sf#5**	**Sf#6**	**Sf#7**	**Sf#8**
Eljárás	Síkmarás		Esztergálás		Síkmarás		Sík köszörülés	
Stratégia	Zig-Zag		Homlok esztergálás		Zig-Zag	Spirál	Kiszikráztatás nélkül	Kiszikráztatva
Géptípus	UF-231	MAZAK A410-II	E400-1000		MAZAK A410-II		Jotes SPD-30B	
Vezérlés	Kézi	CNC	Kézi		CNC		Kézi	
D_c [mm]	80	50	-		63		350	
z	7	4	1		6		-	
v_c [m/min]	60		(100)		180		26 m/s	
n [1/min]	240	382	190		910		1440	
f; f_z [mm]	0.046		0.6	0.2	0.09		-	
v_f [mm/min]	78	70	115	40	490		-	
a_p [mm]	1		0.5		1		0.02	
a_e [mm]	40	25	-		31.5		40	

A síklapúság kísérleti vizsgálatához, a fejlesztett algoritmusok teszteléséhet minta ponthalmazra volt szükség. Ennek érdekében különböző forgácsolási eljárásokkal teszt felületek készültek. A teszt felület mérete 175x155 mm, a teszt darab anyaga 42CrMo5 (WNr. 1.7225) nemesített acél. A nyolc teszt sík megmunkálási adatait a 9. táblázat tartalmazza. A megmunkált felületeken 5 mm-es osztásban 34x30 koordináta pont (1020 darab) lett megmérve egy Mitutoyo Crysta-Plus 544 típusú koordináta mérőgépen [14][19]. Az 50. ábra a mérési adatokat mutatja 1-1 ponthalmaz esetén. A mért pontok alapján a síklapúsági hiba

Kotem Evolve Smart Profile szoftverrel, illetve a saját fejlesztésű algoritmusokkal lett kiértékelve. Az adatelemzések MS Excel és Minitab v14 szoftverekkel készültek.



50. ábra A teszt síkok magassági hibája.

4.1 Minimum zóna módszer implementációinak vizsgálata

A kutatás során a minimum zóna módszert vizsgáltam síklapúsági hiba esetén. Az algoritmusok implementálása Free Pascal 1.0.12 rendszerben történt. Minimum zóna módszer esetén meghatározzuk a mért pontok távolságát egy vizsgálati síktól, a síklapúsági hiba a legközelebbi és a legtávolabbi pont távolságának különbsége. A sík helyzete befolyásolja a pontok távolságát. A hiba meghatározása során keressük a sík azon helyzetét, amikor a legközelebbi és legtávolabbi pont távolsága közti különbség minimális.

Ha a vizsgálati sík egy pontja $\underline{P}_0$ és normálisa $\underline{N}$, akkor a sík egyenlete:

$$N_x \cdot x + N_y \cdot y + N_z \cdot z - \left(N_x \cdot P_{0x} + N_y \cdot P_{0y} + N_z \cdot P_{0z}\right) = 0 \qquad (4\text{-}1)$$

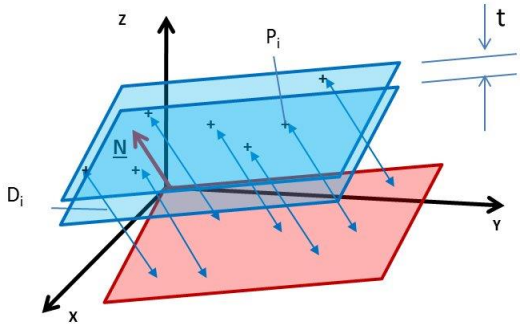
Egy tetszőleges $\underline{P}_i$ pont távolsága a síktól:

$$D_i = \frac{N_x \cdot (P_{0x} - P_{ix}) + N_y \cdot (P_{0y} - P_{iy}) + N_z \cdot (P_{0z} - P_{iz})}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}} \tag{4-2}$$

A síklapúsági hiba pedig:

$$t = D_{i_max} - D_{i_min} \tag{4-3}$$

A sík egy pontja $\underline{P}_0$ = [0,0,0]; kezdeti normál vektora $\underline{N}$ = [0,0,1].



51. ábra Síklapúsági hiba minimum zóna módszer szerint.

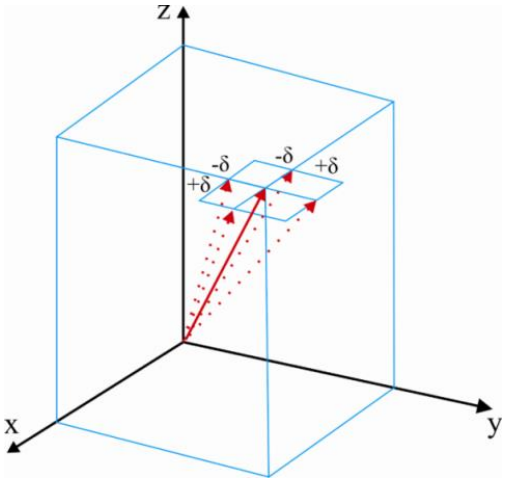
Az első vizsgált algoritmus egy „csúcsra mászás” (hill cimb) algoritmus [17]. Ennek lényege, hogy egy kezdeti megoldásból indulva vizsgálja az adott távolságra (±δ) lévő szomszédokat és azt a szomszédot választja, mely esetén a síklapusági hiba nagyobb mértékben csökken. A következő lépésben ennek a szomszédait vizsgálja és így tovább. A leállási feltétel 10000 ciklus végrehajtása, vagy 10^{-6} mm-nél kisebb különbség két szomszédos megoldás között. A megvalósítás során a normál vektor x és y komponensét változtattam csak (52. ábra), mivel tesztek bizonyították, hogy ha a z koordináta mentén is vizsgáljuk a szomszédos megoldásokat, a megoldás megtalálása bizonytalanabbá válik.

Az algoritmus három változatát vizsgáltam, melyek a δ meghatározási módjában tértek el egymástól. Az algoritmusokat HC1, HC2 és HC3-mal jelöltem. HC1 esetén a távolság véletlen értékű 0 és 10^{-6} között, HC2 esetén véletlen értékű, de az iteráció előrehaladtával csökken (szimulált hűtés), HC3 esetén állandó 10^{-7}.

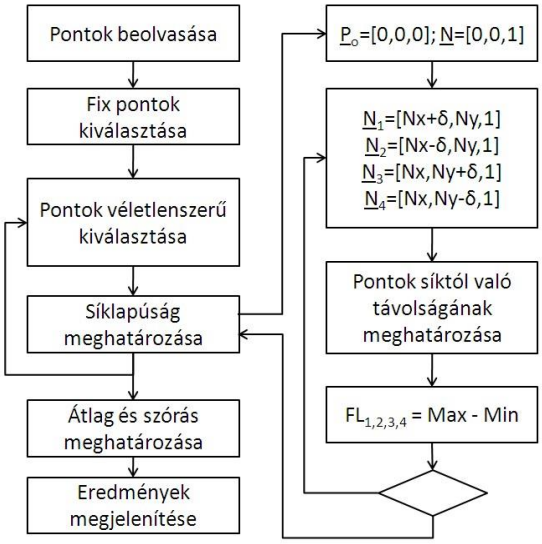
$$\delta_{HC1} = 10^{-6} \cdot (0 \div 1) \tag{4-4}$$

$$\delta_{HC2} = 10^{-6} \cdot \frac{(0 \div 1)}{i} \tag{4-5}$$

$$\delta_{HC3} = 10^{-7} \tag{4-6}$$

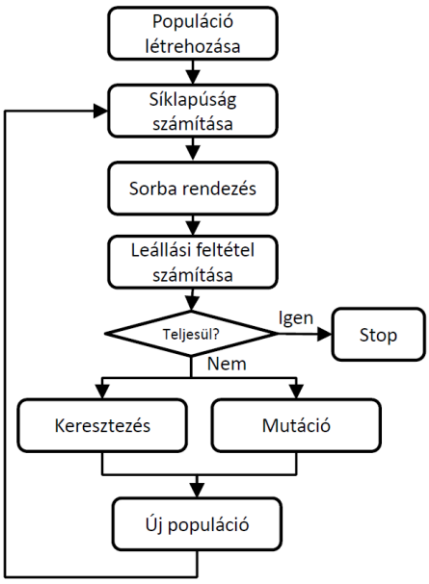


52. ábra A sík normál vektorának szomszédai.

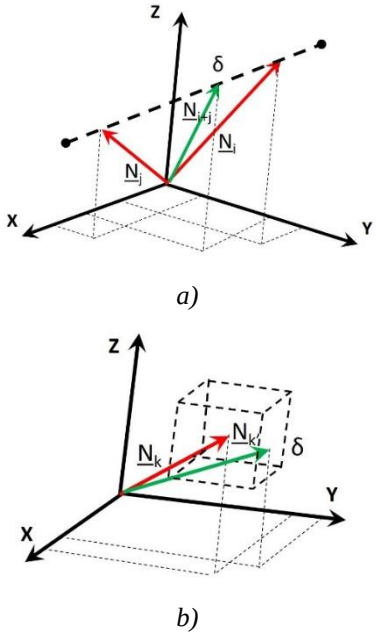


53. ábra Csúcsra mászás algoritmus.

A második vizsgált algoritmus egy genetikus algoritmus (GA), amely az evolúciós elvek alapján egy megoldás halmaz (populáció) genetikus operátorokkal való fejlesztésével keresi a megoldást (54. ábra) [18]. Két genetikus operátor használható, a keresztezés és a mutáció (55. ábra).



54. ábra Genetikus algoritmus lépései.

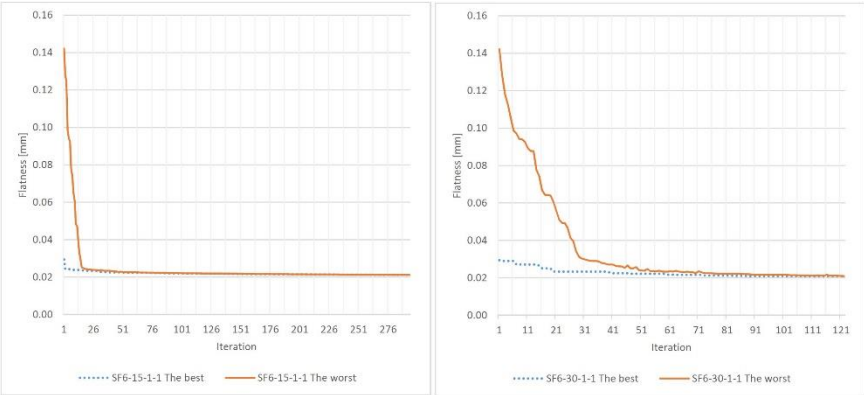


55. ábra Keresztezés (a) és mutáció (b).

Az operátorokat az adott feladatot figyelembe véve kellett megtervezni. Keresztezéssel új egyedeket hozunk létre. Az új vektor a két szülő vektort összekötő 25%-kal meghosszabbított egyenes véletlenszerű pontjára mutat. A mutáció operátor a kiválasztott normál vektort módosítja egy ±10%-os tartományban. A ciklus végén az új populáció mérete megegyezik a kezdő mérettel, a gyenge eredményű egyedek törlődnek. Az egyedek rátermettségét a

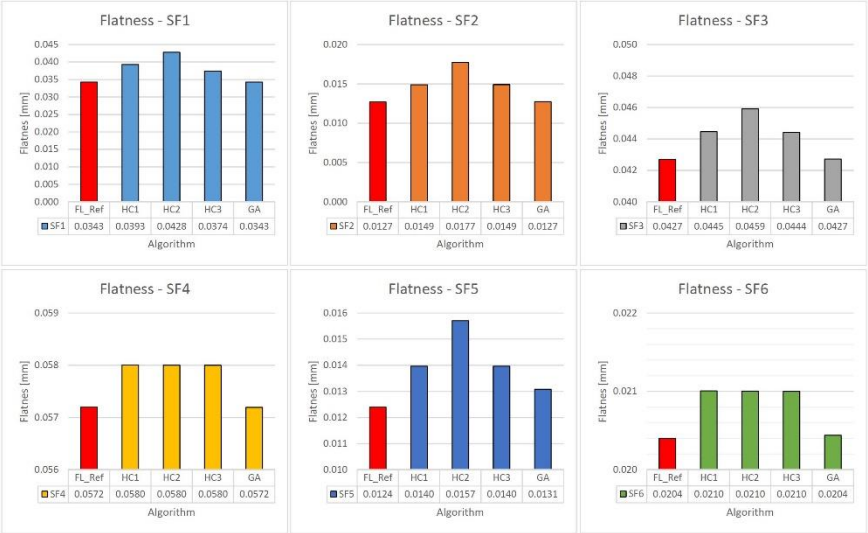
síklapúsági hiba jelenti, minél kisebb a síklapúság, annál jobb az egyed. A leállási feltétel 1000 ciklus vagy a populáció homogenizálódása, a legjobb és a legrosszabb egyed síklapusági hibája közti különbség 10^{-5} mm. Ebben az esetben is csak az x és y koordinátái változtak a normál vektoroknak.

Az algoritmus működésének jóságát három paramétere befolyásolja: mekkora a populáció mérete, hány új egyedet hozunk létre keresztezéssel és hány egyedet változtatunk meg mutációval. Az algoritmus paramétereinek hatását 4/8/6 szinten vizsgáltuk az 1-6 felületekből nyert ponthalmazokon, minden esetben 25-ször ismételve a keresést, így 28800 adat állt rendelkezésre a genetikus algoritmus paramétereinek optimalizálásához. A referencia síklapúság értékeivel összevetve a 25 elemű populáció bizonyult a legjobbnak, ciklusonként 7 új egyedet hozunk létre és 5 egyedet mutálunk (25-7-5).



56. ábra A populáció fejlődése a #6 felület esetén, a beállítások a) 15-1-1 illetve b) 30-1-1.

A négy algoritmus által számolt eredményeket mutatja az 57. ábra. Az első oszlop a referencia értéknek elfogadott Evolve Smart Profile szoftverrel számolt eredményt mutatja. Mint látható, a legjobb eredményt a genetikus algoritmus adja, míg a legrosszabbat a csökkenő távolságokkal dolgozó csúcsra mászás (HC2). A változó és az állandó távolsággal dolgozó HC1 és HC3 közel azonos eredményeket produkált, azonban a HC3 esetén felülettől függően jelentősen több számolási ciklus szükséges (átlagosan 10-szer több). Ismételt futtatások esetén ugyanakkor a HC3 eredményezte a legkisebb szórást. Ezen algoritmusok ugyanis, a véletlenszerű lépések miatt ismételt futtatás esetén nem ugyanazt az eredményt adják, az eltérések azonban általában 0.1 μm alattiak.



57. ábra A síklapúság értékei az 1-6 felületekre a különböző algoritmusokkal meghatározva.

4.2 Pontkiválasztási stratégia hatása a síklapúsági hibára

A síklapúsági hiba értékére számos tényező van hatással. A mérési eredményeket befolyásolja a mért pontok száma, illetve azok elrendezése. Együttesen ezt pontkiválasztási stratégiának nevezzük.

A bemutatásra kerülő kísérlet során [16] 12 féle pontkiválasztási stratégia (*point sampling strategy*) eredményeit vizsgáltuk (58. ábra). A síklapúság hiba minimum zóna módszer alapján MS Excel Solver alkalmazással lett meghatározva.

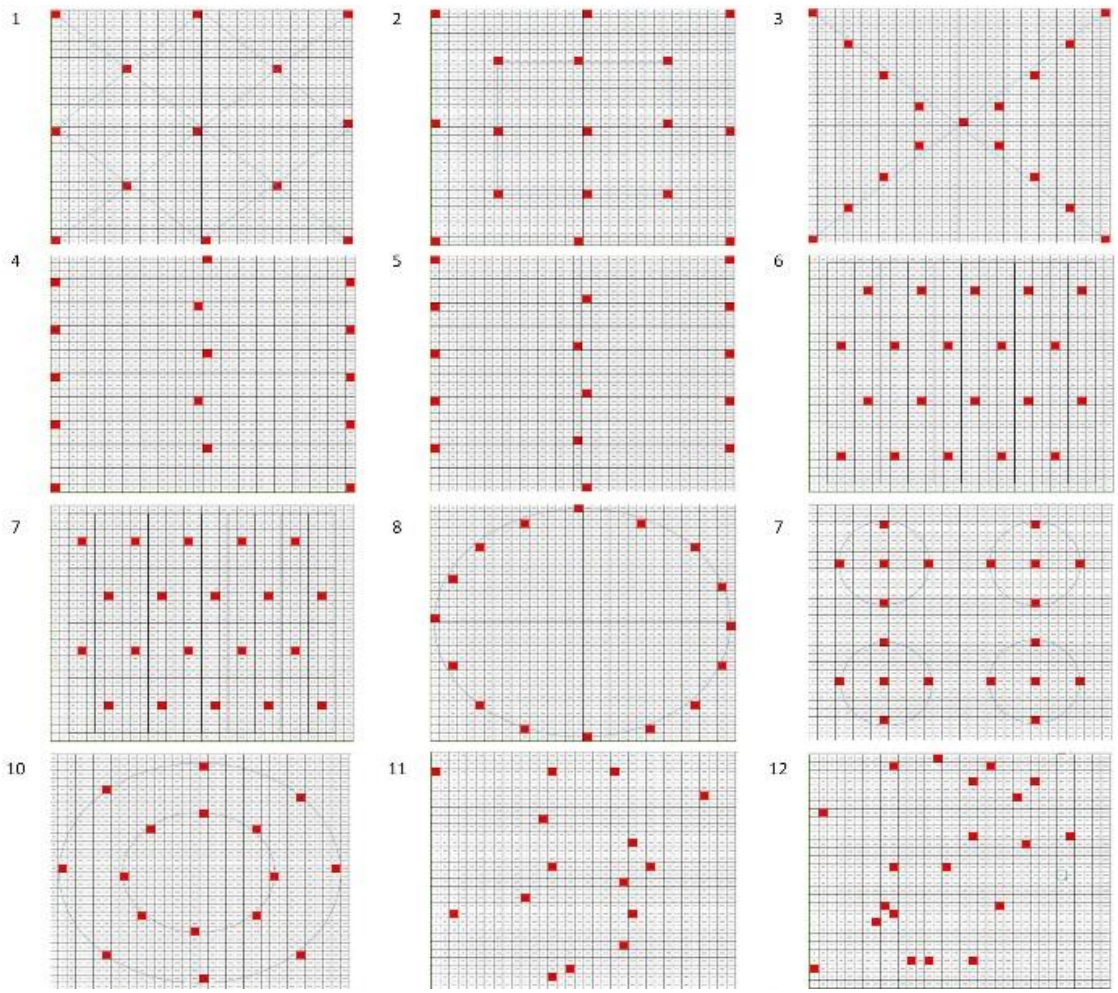
Az eredmények azt mutatják (59. ábra), hogy a pontkiválasztási stratégiáknak jelentős hatása van a síklapúsági hibára. Pontosabb felület esetén (kisebb síklapúsági referencia érték) a hatás kisebb. A célunk a mérési eredmény alapján a referencia értéket minél jobban megközelítő becsült érték meghatározása. Ennek érdekében megvizsgáltam mind a 12 pontkiválasztási módszer esetén, milyen módosító tényező szükséges az eredmény pontosítása érdekében.

$$FL = C_{FL} \cdot FL_c \qquad (4\text{-}7)$$

Az együttható értékét a 10. táblázat mutatja. Az együttható értéke a nyolc felületre számolt együtthatók átlaga, a táblázat tartalmazza ezek szórását is.

10. táblázat Korrekciós együtthatók értékei
a vizsgált 12 pontkiválasztási startégia esetén.

PSS	1	2	3	4	**5**	6	7	8	9	10	11	**12**
C_{FL}	1,95	1,96	2,22	1,93	**1,73**	2,08	2,16	3,21	3,01	2,55	2,16	**2,05**
σ_{CFL}	0,66	0,61	0,98	0,68	**0,40**	0,48	0,45	2,86	1,26	0,81	0,51	**0,33**

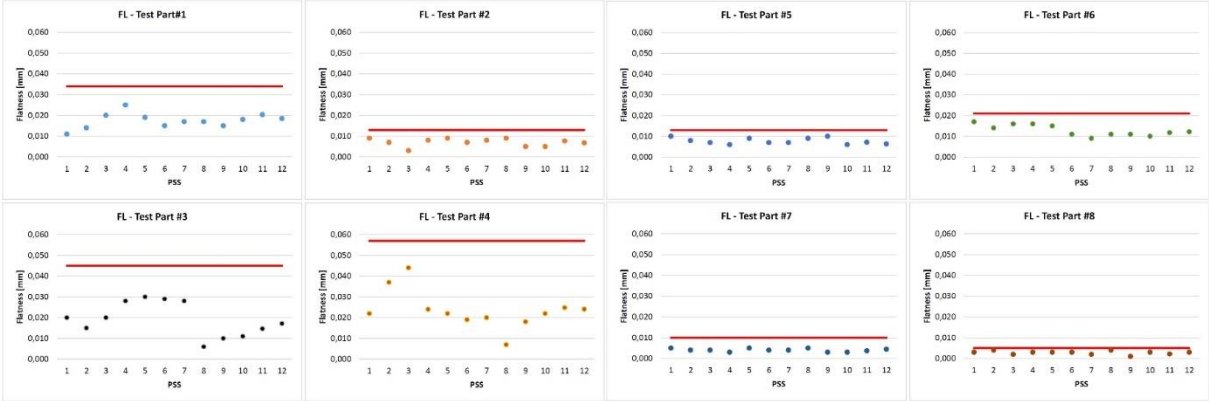


58. ábra A vizsgált pontkiválasztási stratégiák.

1 - 13 pont, sarkok, középpontok és átlók mentén; 2 - 17 pont, sarkok, középpontok és átlók mentén; 3 - 17 pont, az átlók mentén; 4- 15 pont a régiók sarkaiban; 5 - 15 pont a régiók sarkaiban; 6 - 20 pont a régiók közepén, sakktábla elrendezés; 7 - 20 pont a régiók közepén, sakktábla elrendezés; 8- 16 pont egy kör mentén; 9 - 20 pont 4 kör mentén, 4 kör középpontja; 10 - 16 pont két koncentrikus kör mentén; 11 - 16 véletlenszerű pont ; 12 - 20 véletlenszerű pont

Az a pontkiválasztási stratégia kedvező, ahol a módosító együttható értékének kicsi a szórása. Ez alapján a „20 véletlenszerű pont” a legkedvezőbb, megelőzve a szabályos stratégiákat. Ezek közül a régiók sarok vagy középpontjainak kiválasztása tűnik még megfelelőnek. A többi stratégia vagy túl kevés pontot tartalmaz, vagy fontos régiókat nem fed le, mint például a 8. és 10. stratégia az esztergálással előállított felületeknél nagyon rosszul szerepelt.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a mérési terv készítése során a mérési pontok elhelyezkedésének és számának jelentős hatása van a mérés eredményére.

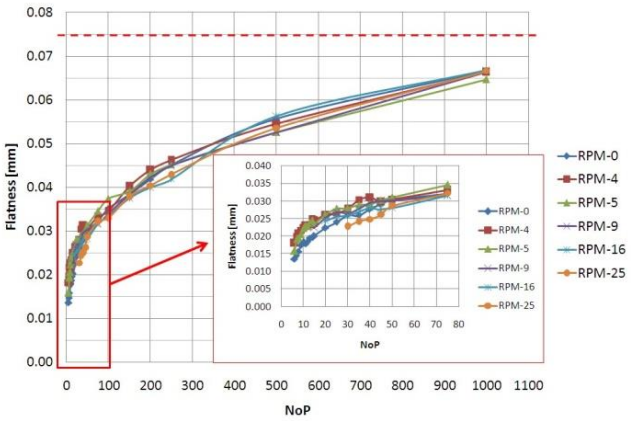


59. ábra Síklapúsági hiba számított értkei a 12 pontkiválasztási stratégia függvényében.

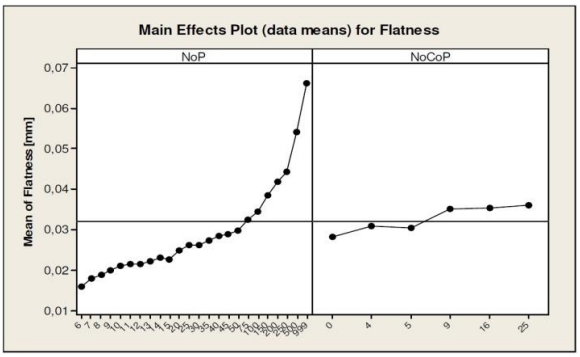
4.3 Hibrid pontkiválasztási stratégia vizsgálata

A mérési pontok számának vizsgálata az #1 jelű felület vizsgálatával történt. A pontkiválasztás során egy hibrid eljárást definiáltam. Ebben - a véletlenszerűen kiválasztott pontok mellett - fix pontok is szerepelnek [15]. 0, 4, 5, 9, 16 és 25 szabályszerűen elhelyezett pontokat (NoCoP) további véletlenszerű pontokkal egészítettük ki úgy, hogy a pontok száma 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 500, és 999 legyen. (NoP).

A síklapúsági hiba eredményeiből látszik (60. ábra), hogy a pontok számának növelésével, a hiba meghatározott értéke egyre közelebb kerül a referencia értékhez (1020 pont alapján meghatározott síklapúság hiba).



60. ábra Síklapúsági hiba a kiértékelt pontok függvényében.



61. ábra A síklapúsági hiba főhatás ábrái.

A főhatás ábrából kiderül (61. ábra), hogy a fix pontoknak van hatása, de jóval kisebb, mint az összes pontok számának. A tisztán véletlenszerű elrendezés a legkedvezőtlenebb, de a pontok számának növelése elnyomja ezt a hatást. Az azonos paraméterekkel végzett ismételt

futtatások eredményeinek szórásán jól látszik a különbség. A pontok számának növelésével a szórás nő, de a fix pontok okozta különbség csökken.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kapott síklapúsági értékek nem érik el a referencia értéket. Az érték viszont becsülhető a pontok száma és a fix pontok szám alapján:

$$FL_E = C_{FL} \cdot FL_M \,. \tag{4-8}$$

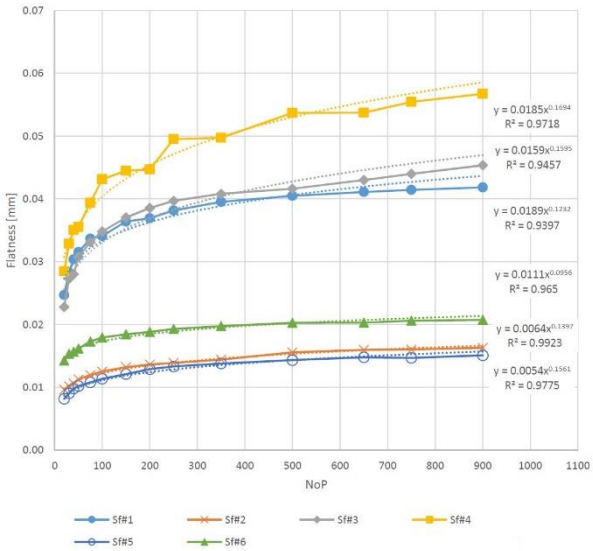
$$C_{FL} = f(NoP, NoCoP) \tag{4-9}$$

A módosító tényezőt egy szűkebb adathalmazra határoztam meg, melyben nem szerepelnek a tisztén véletlenszerű pontok alapján végzett mérések, valamint az 50 pontnál többet tartalmazók. Ezzel a mérési idő csökkenthető. Így a módosító tényező (R^2adj=0.902):

$$C_{FL} = 4.7991 - 0.6607 \cdot \ln(NoP) - 0.0238 \cdot NoCoP \tag{4-10}$$

A módosító tényező segítségével a síklapúsági hiba becsült értéke a referencia érték ±0.005 mm-es környezetében helyezkedik el.

A kutatás további szakaszában vizsgálandó a módszer kiterjesztése a többi technológiával készült felületre is, annak érdekében, hogy minél szélesebb adathalmaz alapján kerüljön meghatározásra a módosító tényező értéke.



62. ábra Síklapúsági hiba értékei a teszt darabokra, a mérési pontok számának függvényében.

4.4 Regresszió és extrapoláció alkalmazása a síklapúság meghatározásában

A véletlenszerű pontkiválasztási stratégia esetén vizsgáltam a pontok számának hatását a síklapúsági hiba értékére. Az elemzés során a 7. és 8. felületeket nem vizsgáltam, így 6 felület lett bevonva a vizsgálatba. A mért 1020 pont közül 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 350, 500, 650, 750 és 900 lett véletlenszerűen kiválasztva 100 alkalommal, és ezek

átlagértékeit mutatja a 62. ábra. Mint látható, a pontok számának függvényében igen pontos regresszió illeszthető az eredményekre a következő formában:

$$FL = A \cdot NoP^B \tag{4-11}$$

ahol FL – a síklapúsági hiba, NoP – mérési pontok száma, A, B – együtthatók.

A megfigyelés alapján kidolgoztam egy eljárást, mely kis számú mérési pont felhasználásával, azok rész kiértékelésével becsüli a síklapúsági hiba értékét [19]. Az eljárás a következő lépésekből áll:

- Mérjük meg a felület pontjait a kiválasztott stratégia alapján.
- A pontokból alkossunk 6 halmazt.
- Határozzuk meg a síklapúsági hibát az 1. halmazra, az 1. és 2. halmazra együttesen, a 1. 2. és 3. halmazra és így tovább.
- Határozzuk meg a regressziós összefüggés együtthatóit a hat síklapúsági érték és a hozzá tartozó pontok száma alapján az 5-2 alakban.
- Becsüljük a síklapúsági hibát a mérési pontok számának behelyettesítésével a regressziós összefüggés extrapolációjával (NoP=1020).

A vizsgálat során Halton-Zeremba pontkiválasztási stratégiát alkalmaztam, mely jól lefedi a vizsgált tartományt, ugyanakkor nem mutat olyan jellegű szabályszerűséget, mely torzítja a mérés eredményét [Woo1995] [Mor2015]. 64 mérési pontot választottam, mivel ez már kellően sok pont a pontos becsléshez, ugyanakkor elfogadható mérési időt biztosít.

A síklapúság a korábban ismertetett minimum zóna módszert megvalósító csúcsra-mászás algoritmussal lett meghatározva. 20 ismételt futtatás extrapolált eredményét mutatja a 63. ábra. Az első, piros oszlop a referencia érték. Mint látható, a 2. felület esetén nagyon jó eredményt kapunk, míg az 1. és 3. felület esetén a becslés nem túl jó. A becslés javítása érdekében az A és B együtthatókra bevezettem egy módosító tényezőt, mely a mérési eredmények alapján lett meghatározva:

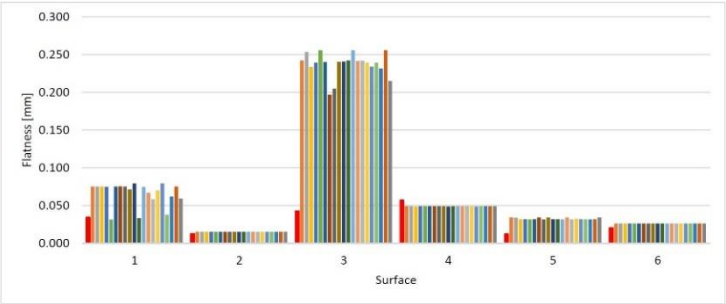
$$A' = C_A \cdot A \tag{4-12}$$

$$B' = C_B \cdot B \tag{4-13}$$

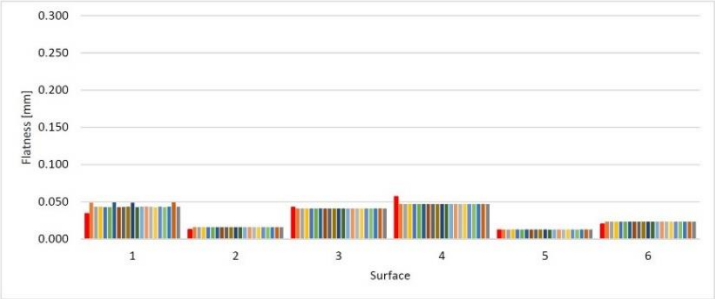
ahol *A, B* – az eredeti együtthatók, *A', B'*- a módosított együtthatók, C_A, C_B: - a módosító tényezők.

A kiértékelés alapján a két módosító tényező értéke C_A=1.802 és C_B=0.466. A módosított képlettel meghatározott síklapúsági hiba már megfelelő eltéréssel határozza meg a keresett értéket (64. ábra).

A témával kapcsolatos további kutatási feladat a módszer általánosítása, hogyan célszerű kijelölni a részhalmazokat, mennyire alkalmazható az itt meghatározott módosító tényezők értékei más eljárással készült felületek esetén, hogyan befolyásolja a mérés eredményét a felület mérete.



63. ábra Extrapolációval becsült síklapúsági hiba értékei.



64. ábra A módosított extrapolációval meghatározott síklapúsági hiba értékei.

4.5 Tézisek

7. Tézis Síklapúsági hiba minimum zóna módszerrel történő meghatározásához kereső algoritmusokat dolgoztam ki. Megállapítottam, hogy mind a csúcsra mászás, mind a genetikus algoritmus esetén az algoritmus paramétereinek módosításával javítható az algoritmus hatékonysága, az eltérések azonban műszaki (alkalmazási) szempontból nem jelentősek. [17][18]

8. Tézis Kísérletek alapján megállapítottam, hogy síklapúság esetén a mért pontok száma és elhelyezkedése hatással van a mérés eredményére. Ez a hatás korrekciós tényezőkkel befolyásolható. Megállapítottam, hogy véletlen pontkiválasztás esetén fix helyzetű pontok felvétele (hibrid stratégia) javítja a számítás eredményét. [15][16]

9. Tézis Számítási eljárást dolgoztam ki, amely a mért pontok részhalmazai alapján meghatározott síklapúsági hiba függvény extrapolációjával határozza meg a felület síklapúsági hiba értékét. Az eljárás csökkenti a mérési pontok korlátozott számából adódó hibát. [19]

5. A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja

A tézisekhez kapcsolódó publikációk hatását a hivatkozásokon keresztül mutatom be.

A 3D marással kapcsolatos 9 publikáció 65 idegen hivatkozást kapott. A teraszoló kontúrmarás témánál hivatkozott 5 cikk 11 idegen hivatkozással rendelkezik, míg a legfiatalabb síklapúság vizsgálati téma 6 cikke 8 hivatkozással.

A hivatkozások között mind folyóirat (Scopus, WOS), mind konferencia cikk megtalálható. A hivatkozások között angol és magyar nyelvű publikációk mellett lengyel, portugál és indonéz is előfordul.

3D marási stratégia és a teraszoló kontúrmarással kapcsolatos cikkek esetén a hivatkozó cikkek az érdesség meghatározásához kapcsolódnak, illetve a gömbvégű marás szélesebb körét vizsgálják, mint a szerszámpálya tervezés, szerszámkopás okai vagy a forgácsolási erők számítása (meghatározása). E mellett például gömbvégű szerszámmal végzett köszörülés témaköre is előfordul. A hivatkozó cikkek egy másik köre a felületi érdesség kialakulását, becslését vizsgálja más jellegű forgácsoló eljárások során, a hivatkozott eredményeket pedig mint analógiákat említik.

A síklapúság vizsgálatával kapcsolatos hivatkozások a geometriai tűrések gyártástechnológiai szempontú vizsgálatával kapcsolatos cikkekben jelentek meg. A geometriai tűrések vizsgálatát növekvő érdeklődés jellemzi tapasztalatom szerint, ez a téma perspektivikus a jövőre nézve. Mivel ez a kutatási téma viszonylag új, a jelentősebb publikációk 2019-től jelentek meg, így a hivatkozások száma csekély.

2005-től tanszékünk tagja az SK-0067 jelű CEEPUS hálózatnak, melyben szoros oktatási és kutatási kapcsolatot építettünk ki magyar, szlovák, szerb, cseh és lengyel társ tanszékek kutatóival. Ezen körben a forgácsolás technológia és a mikrogeometria kapcsolatának kutatása közös terület. Az évenként megrendezett DiM konferenciákon bemutatott eredményeim kedvező értékelést kaptak.

Az eredményekre építve két PhD kutatási témát indítottam 2017-ben és 2019-ben. Az egyik a marási stratégiák hatásának vizsgálatával foglalkozik szabad formájú felületek alakpontosságára, míg a másik gömbvégű maró dolgozó átmérőjének változását vizsgálja.

6. Irodalmi hivatkozások

[Ben2016] J. Beňo, I. Manková, P. Ižol, M. Vrabel' (2016) An approach to the evaluation of multivariate data during ball end milling free-form surface fragments. Measurement 84:7-20.

[Ber2003] P.G. Bernardos, G.C. Vosniakos (2003) Predicting surface roughness in machining: a review. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43:833–844.

[Bil2014] O. Bilek, D. Samek, O. Suba (2014) Investigation of surface roughness while ball milling process. Key Engineering Materials 581:335-340.

[Fan2014] J. Fan (2014) Cutting speed modelling in ball nose milling applications. Int J Adv Manuf Technol 73:161-171

[Fel2015] Felhő Cs.; Karpuschewski B.; Kundrák J. (2015) Surface roughness modelling in face milling. Procedia CIRP 31:136-141

[Fod2012] Fodor A, Boza P, Takács N. (2012) Machining of free-form surfaces in 3D and 5D; Proc. of Manufacturing 2012 Budapest

[Gra2015] L. Grandguillaume, S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Tournier (2015) Mold manufacturing optimization: A global approach of milling and polishing processes. Procedia CIRP 31:13-18.

[Grz2010] W. Grzesik, B. Kruszynski, A. Ruszaj (2010) Surface integrity of machined surfaces. Surface Integrity in Machining. Springer London. pp.143-179 DOI 10.1007/978-1-84882-874-2_5

[Hen2006] G. Henzold: Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design. Manufacturing and Inspection, Elsevier, 2006

[Ho2003] K.H. Ho, S.T. Newman (2003) State of the art electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools & Manufacture 43:1287-1300

[Izo2016] P. Ižol; M. Tomáš; J. Beňo (2016) Milling strategies evaluation when simulating the forming dies' functional surfaces production. Open Eng. 6:98–105

[Kov2017] P. Kovač; B. Savković; M. Gostimirovic; D. Jesic; I. Mankova (2017) Modelling of the Machining Surface Roughness Parameters for Steel Difficult to Machining. Analele Universitatii "Eftimie Murgu" XXIV 1

[Maj2009] Major Tamás (2009) Szikraforgácsolás elektródakopás nélkül. Gyártóeszközök, Szerszámok, Szerszámgépek, 2009(1):11-13

[Mar2015] Marczis Attila, Drégelyi-Kiss Ágota: Köralak mérésének vizsgálata profilprojektorral történő mérések során. Gyártóeszközök, Szerszámok, Szerszámgépek 2015/1, 22-25, 2015

[Mik2001] Mikó Balázs (2001) Technológiai előtervezés automatizálása mesterséges intelligencia módszerek segítségével. Doktori (PhD) disszertáció Témavezető: Dr. Szegh Imre BME Budapest

[Mor2011] G. Moroni, S. Petro (2011) Coordinate measuring machine measurement planning. Colosimo B, Senin N (eds) Geometric Tolerances. Springer, London pp.111-158

[Mut2015] T. Muthuramalingam, B. Mohan (2015) A review on influence of electrical process parameters in EDM process. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(1):87-94

[Nagy2015] Nagy Júlia, Sándor Miklós, Drégelyi-Kiss Ágota (2015) Körmérések a koordináta méréstechnika területén. Gyártóeszközök, Szerszámok, Szerszámgépek 2015(1):26-28

[Pen2015] A E Pena; F D Anania; M Zapciu (2015) Research concerning optimum cutting parameters according with tool path strategy for finishing procedures. Mat Sci and Eng 95 ID: 012020

[Sal2016] H.R. Sales; H. Amirabadi; H.N. Hosseinabadi; M.R. Bagheri (2016) Experimental study of tool path strategies for three and five axes milling along with feed rate optimization. Indian J of Science and Technology 9(43)

[Sou2014a] A.F. de Souza; A.E. Diniz; A.R. Rodrigues; R.T. Coelho (2014) Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. Int J Adv Manuf Technol 71:1565–1577

[Sou2014b] A.F. de Souza; A. Machado; S.F. Beckert; A.E. Diniz (2014) Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. Proc CIRP 188–193

[Toh2005] K.C. Toh (2005) Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials; Materials and Design 26:517–533

[Vop2015] T. Vopát; J. Peterka; V. Šimna; M. Kuruc (2015) The influence of different types of copy milling on the surface roughness and tool life of end mills. Procedia Engineering 100:868–876

[Vyb2016] A.V. Vyboishchik (2016) Modelling topology of freeform surfaces with ball-end milling. Procedia Engineering 150:761–767

[Woj2014] S. Wojciechowski; P. Twardowski; M. Wieczorowski (2014) Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel. Metrology and Measurement Systems 21(1):145–156

[Woj2015] S. Wojciechowski; T. Chwalczuk; P. Twardowski; G.M. Krolczyk (2015) Modelling of cutter displacements during ball end milling of inclined surfaces. Archives of Civil and Mechanical Eng 15:798-805

[Woo1995] T.C. Woo, R. Liang, C.C. Hsieh, N.K. Lee (1995) Efficient sampling for surface measurements. Journal of Manufacturing Systems 14(5):345-354

[Xu2018] J. Xu; H. Zhang; Y. Sun (2018) Swept surface-based approach to simulating surface topography in ball-end milling. Int J Adv Manuf Technol 98:107-118

[Zeb2014] W. Zebala, M. Plaza (2014) Comparative study of 3- and 5-axis CNC centres for free-form machining of difficult-to-cut material. Int. J. Production Economics 158:345–358.

Szabványok:

[ISO1101] ISO 1101-2017 (2017). Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO

[ISO14405] ISO 14405-1:2010 (2010) Geometrical product specifications (GPS) - Dimensional tolerancing - Part 1: Linear sizes

[ISO4287] ISO 4287-2002 (2002) Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters

[ASME14.5] ASME Y14.5-2018 (2018) Dimensioning and Tolerancing. ASME

7. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

A publikációk témánként és a megjelenés sorrendjében rendezve.

3D felület marás vizsgálata

[1] Mikó B.; Beňo J.; Izol P.; Maňková I. (2011) Surface quality of sculpture surface in case of 3D milling; 8th Int. Tool Conf. ITC2011. Zlin Cz. CD proceeding; ISBN:978-80.7454-026-4

[2] Mikó B.; Beno J.; Mankova I. (2012) Experimental Verification of Cusp Heights when 3D Milling Rounded Surfaces; Acta Polytechnica Hungarica 9(6):101-116, ISSN 1785-8860 (IF 0.588)

[3] Mikó B.; J. Beno (2014) Effect of the Working Diameter to the Surface Quality in Free-form Surface Milling; Key Engineering Materials 581:372-377 ISSN: 1013-9826

[4] Mikó B.; Drégelyi-Kiss Á.; Poór A. (2014) Study of surface quality and electrode wear in EDM technology. Development in Machining Technology 4:194-211. Cracow University of Technology, Cracow PL. ISBN 978-83-7242-765-6

[5] Mikó B.; Baranyai G. (2015) The effect of milling direction to surface quality when free form surface finishing. Development in Machining Technology 5:62-76. Cracow University of Technology, Cracow PL ISBN 978-83-7242-844-8

[6] Mikó B.; Baranyai G. (2016) Comparision of milling strategies in case of free form surface milling; Development in Machining Technology 6:76-86. Cracow University of Technology, Cracow PL. ISBN 978-80-553-2576-7

[7] Mikó B. (2016) Investigation of the surface quality of the EDM electrode and the machined surface; Proc. of MultiScience – XXX. microCAD 2016 Miskolc Hungary; CD D1_4; ISBN 978-963-358-113-1 2016.04.21-22.

[8] Mikó B.; Tóth B.; Varga B. (2017) Comparison of Theoretical and Real Surface Roughness in Case of Ball-End Milling. Solid State Phenomena, 261:299-304 DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.261.299 ISSN: 1662-9779

[9] Mikó B.; Zentay P.Z. (2019) A geometric approach of working tool diameter in 3-axis ball-end milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; 104(1-4):1497–1507 DOI: 10.1007/s00170-019-03968-9 (IF 2.633)

Teraszoló kontúrmarás vizsgálata

[10] Mikó B.; Béni B. (2012) Study of surface roughness in case of z-level finishing; Manufacturing 2012 Conference, Budapest CD proceeding, ISBN 978-963-9058-35-4

[11] Mikó B. (2012) Study of z-level finishing milling strategy; Chapter 2.1 in Development in Machining Technology 2:83-90 Cracow University of Technology Cracow PL ISBN 978-83-7242-655-0

[12] Mikó B. (2016) Surface quality prediction in case of steep free form surface milling; Key Engineering Materials, 686:119-124. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.686.119

[13] Mikó B.; Horváth T.; Varga B. (2018) Cusp height and surface roughness in z-level milling; Development in Machining Technology 8:123-133 Cracow University of Technology, Cracow PL ISBN 978-80-553-2718-1

Síklapúság vizsgálata:

[14] Mikó B.; Farkas G. (2017) Comparision of flatness and surface roughness parameters when face milling and turning; Development in Machining Technology 7:18-27. Cracow University of Technology, Cracow PL ISBN 978-80-553-3193-5

[15] Mikó B. (2018) Measurement and evaluation of the flatness error of a milled plain surface; XXIII International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2018); IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 448:012007 DOI:10.1088/1757-899X/448/1/012007

[16] Mikó B.; Farkas G.; Bodonyi I. (2019) Investigation of point sampling strategies in case of flatness. Cutting & Tooling in Technological Systems (Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskih sistemah) (ISSN 2078-7405) 91:143-156 DOI:10.20998/2078-7405.2019.91.14

[17] Štrbac B.; Mikó B.; Rodić D.; Nagy J.; Hadžistević M. (2020) Analysis of characteristics of non-commercial software systems for assessing flatness error by means of minimum zone method. Tehnički vjesnik 27(2):535-541, (IF 0.67) DOI: 10.17559/TV-20190603084835

[18] Mikó B.; Szabó S.M.; Drégelyi-Kiss Á. (2021) Application of genetic algorithm for minimum zone method of flatness. Acta Polytechnica Hungarica 18(3):107-126 ISSN 1785-8860 (IF 1.219) DOI: 10.12700/APH.18.3.2021.3.6

[19] Mikó B. (2021) Assessment of flatness error by regression analysis. Measurement 171:108720 ISSN: 0263-2241 (IF: 3.364) DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108720

A témához kapcsolódó további publikációk:

[20] J Beno, P Izol, B Mikó, I Mankova (2009) Scalling effect in peripheral milling of form surfaces; Production process in mechanical engineering CEEPUS CII-SK 0067-04-08/09, Cracow-Kosice pp.101-106. ISBN 978-83-7242-509-6

[21] J Beno, P Izol, B Mikó, I Mankova (2009) Visual interpretation of new surface when form milling. In Production process in mechanical engineering, Advanced Machinning Technology in Automotive Production. Cracow, November pp. 100-106. ISBN 978-83-7242-509-6.

[22] P Izol, J Beno, B Mikó (2011): Precision and surface roughness when free-form-surface milling; Manufacturing Engineering 1:70-73. ISSN 1335-7972

[23] Mikó B., Drégelyi-Kiss Á. (2015) Study on tolerance of shape and orientation in case of shoulder milling; Development in Machining Technology 5:136-150. Cracow University of Technology, Cracow ISBN 978-83-7242-844-8

[24] Mikó Balázs; Poór Attila: Elektróda felületi minőségének hatása a szikraforgácsolt felületre; Gépgyártás LV. Évfolyam 2015/2. pp.130-134. ISSN 1587-4648

[25] Mikó B. (2016) Mart felület síklapúságának vizsgálata; Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki (IESB 2016) Budapest; No08 . ISBN: 978-615-5460-95-1

[26] Mikó B. (2018) Tűrésezési folyamat kapcsolatai és hatásai; III. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia Budapest; ID: 2A1; ISBN 978-963-9058-40-8

[27] Varga B.; Mikó B. (2018) Szabad formájú mart felületek érdességének változása a simítási irány függvényében; Bánki Közlemények - Bánki Reports 1(2):85-90 ISSN 2560-2810

[28] Varga B.; Mikó B. (2018) Curved surface roughness and cylindricity; Development in Machining Technology 8:66-75 Cracow University of Technology, Cracow 2018. ISBN 978-80-553-2718-1

[29] Mikó B.; Rácz G. (2019) Investigation of Flatness and Angularity in Case of Ball-End Milling. Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018. ISPR 2018. PP. 65-72; Springer, Cham; DOI: 10.1007/978-3-319-92267-6_5; ISBN 978-3-319-92266-9

[30] Mikó B.; Nagy J. (2019) Surface profile error of free form surface in Z-level milling; Development in Machining Technology 9:75-85 Cracow University of Technology, Cracow PL ISBN 978-80-553-3344-1

[31] Varga B.; Mikó B. (2019) Felületi érdesség változása szabad formájú felület marása során. Mérnöki Szimpózium a Bánkiban ESB 2019 pp.49-54 ISBN 978-963-449-189-7

[32] A.W. Mgherony; B. Mikó; Á. Drégelyi-Kiss (2020) Design of experiment in investigation regarding milling machinery. Cutting & Tooling in Technological Systems (Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskih sistemah) (ISSN 2078-7405) 92:68-84 DOI: 10.20998/2078–7405.2020.92.09