

Szabad formájú felületek marási körülményeinek javítása

Improving of milling condition of free-form surfaces

Mikó Balázs*, Varga Bálint*, Abdulwahab Mgherony*

* Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

miko.balazs@bgk.uni-obuda.hu; varga.balint@bgk.uni-obuda.hu; abdulwahab.mgherony@uni-obuda.hu

Összefoglalás — Szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő simítása esetén a forgácsolás körülményei a felület változása miatt folyamatosan változnak. Ez kihat a szerszám terhelésére, a gyártott felület érdességére és alakpontosságára. A cikk bemutatja a változó marási körülményekből adódó eltéréseket, valamint a folyamatos fordulatszám szabályozás módszerét, és az ezzel elérhető eredményeket.

Kulcsszavak: simító marás, gömbvégű maró, felületi érdesség, fordulatszám szabályozás

Abstract — When finishing free-form surfaces with ball-end milling cutters, the cutting circumstances are constantly changing as the surface changes. This affects the load on the tool, the roughness and the accuracy of the finished surface. The paper describes the variations due to changing milling conditions, as well as the method of continuous speed control and the results that can be achieved.

Keywords: finishing milling, ball-end milling, surface roughness, spindle speed control

1 BEVEZETÉS

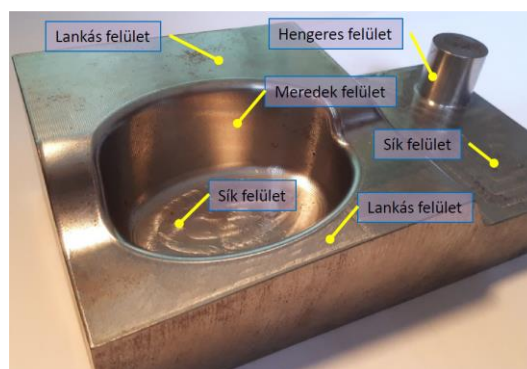
A szabad formájú felületek alapvető szerepet játszanak az olyan gépkatrészek esetében, ahol a kialakítást esztétikai vagy áramlási szempontok határozzák meg, mint például a karosszériaelemek és az utastér burkolati elemei, vagy a háztartási gépek burkolatai. Az ilyen alkatrészeket előállító alakító és öntőszerszámok tartalmazzák az alkatrész felületének negatív formáját, amelyet általában 3D vagy 5D marási technológiával dolgoznak fel. A makro- és mikro pontosság nagyon fontos a szabadformájú felület marásakor, mivel ezek a felületek általában az öntő- vagy formázószerszámok részét képezik, amelyek felületét az öntött, fröccsöntött vagy formázott felületre másolják. Ugyanakkor az öntő- és alakítószerszámok 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 szerszám-pálya-előállítás bonyolult számítást igényel. A CAM rendszerek számos marási stratégiát tartalmaznak, amelyek meghatározzák a műveletem 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 forgácsolási folyamatot több tényező határozza meg [1][2][3][4][5]:

- munkadarab anyagminősége (összetevők, keménység, szakító szilárdság, szövetszerkezet, stb.);
- a munkadarab geometriája (a geometria jellege);
- a szerszám tulajdonságai (anyag, bevonat, élgeometria, geometriai méretek, kopottsági állapot, stb.);
- forgácsolási paraméterek (forgácsolási sebesség, előtolás, fogásmélység);
- szerszám-pálya (a pálya jellege, előtolás iránya);
- szerszám-gép (munkatér mérete, merevség, vezérlés, stb.);
- készülék (helyzetmeghatározás módja, felépítés, merevség, stb.).

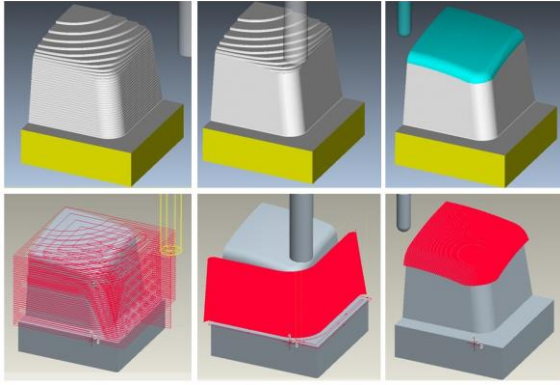
A különböző típusú felületek különböző megmunkálási stratégiákat igényelnek. Marás esetén a simítás megvalósítható 3D felület marással gömbvégű maróval lankás felület esetén, vagy teraszoló kontúrmarással újjmaróval vagy toroid (sarokrádiuszos) maróval meredek felület esetén (1. ábra).



1. ábra: Többféle felületet tartalmazó teszt darab.

Szabad formájú felületek megmunkálása során a legfontosabb CAM stratégiák a térfogatmarás, a kontúrmarás és a 3D felületi marás (2. ábra). Általában a térfogat marás nagyoló, a kontúr és 3D felületmarás simító megmunkálás.

A kutatásunk célja szabad formájú felületek marási technológiáinak vizsgálata, a forgácsolási technológia (szerszám, forgácsolási paraméterek, szerszám-pálya) hatásának vizsgálata a felület mikro és makropontosságára.



2. ábra: Térfogat marás, kontúr marás és 3D felület marás.

Jelen cikkben lankás felületek gömbvégű maróval történő megmunkálásának kérdésével foglalkozunk. Egy-egy kísérleten keresztül mutatjuk be a marási körülményekben bekövetkező változások hatását a forgácsolási erőre, valamint a felület geometriai pontosságára, valamint a folyamatos főorsó fordulatszám szabályozás hatását a felületi érdességre.

2 ANYAGOK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

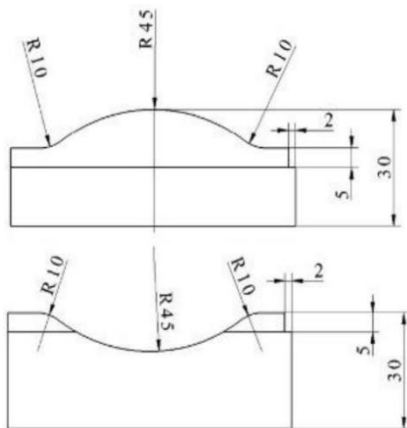
A kísérletek során kétféle alkatrész geometriát vizsgáltunk. Az első 80x80 mm méretű, homorú (konkáv - CV) és domború (konvex - CX) íves felületet tartalmazó, 42CrMo4 (1.7225; $R_m = 1000$ MPa) alacsony ötvöztetésű acélból készült (3. ábra).

A második teszt alkatrész 50x50 mm méretű, gömb ($R=106.25$ mm), sík és azokat összekötő tórusz ($R=25$ mm) felületet tartalmaz. Anyaga C45 (1.0503; $R_m=560$ MPa) közepes széntartalmú ötvöztelen acél (4. ábra).

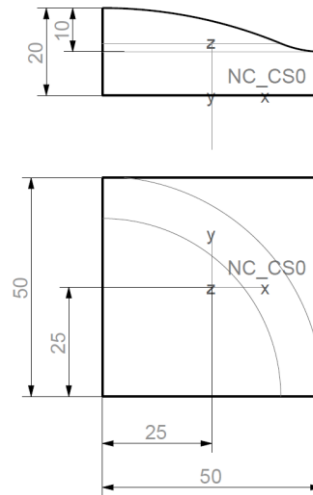
A marási kísérleteket egy Mazak 410-AII CNC vezérlésű megmunkáló központon végeztük, a szükséges NC programokat ProEngineer WF4 illetve CATIA v5 CAD/CAM rendszerrel állítottuk elő.

A felületi érdességet Mahr-Perten GD120 érdesség mérővel mértük. A geometriai hibáját Mitutoyo Crysta-Plus 544 típusú koordináta mérőgéppel mértük, a kiértékelés során Kotem Evolve SmartProfile szoftvert használtuk.

A forgácsolási erő mérése egy KISTLER 5019 3 komponensű erőmérő készülék segítségével történt. Az adatokat DynoWare szoftverrel értékeltük ki. Az erőméréseket 2000 Hz-es frekvencián végeztük.



3. ábra: Teszt alkatrész No.1



4. ábra: Teszt alkatrész No.2

Az erőmérési és geometriai pontosságot vizsgáló kísérlet során a következő paramétereket alkalmaztuk az 1. tesztalkatrész esetén. A felületek 10 mm átmérőjű (D_c), 4 élű (z) Fraisa X7450.450 tömör keményfém gömbvégű maróval lettek megmunkálva. A maró fordulatszáma $n=5100$ 1/min, ami $v_c=160$ m/min névleges forgácsolási sebességet jelent. A fogásmélység $a_p=0.3$ mm, amit elősimítással biztosítottunk. Az előtolás és a fogásmélység értékét 3-3 szinten változtattuk az 1. Táblázat szerint. A marás az y tengellyel párhuzamosan történt.

1. táblázat: Erőmérési kísérlet marási paraméterei

Tesztadarab	f_z [mm]	a_e [mm]
1	0.08	0.35
2	0.08	0.25
3	0.16	0.15
4	0.12	0.15
5	0.08	0.15
6	0.16	0.35

A felületi érdesség vizsgálat a következő paraméterekkel történt a 2. tesztalkatrész esetén. Az tesztalkatrészeket egy 10 mm átmérőjű (D_c) és 2 élű (z) YG G9F44100N tömör keményfém gömbvégű maróval munkáltuk meg.

A forgácsolási paraméterek a következők voltak: a névleges forgácsolási sebesség $v_c=63$ m/perc, a fogankénti előtolás $f_z=0.125$ mm. A forgácsolási paraméterek meghatározásánál figyelembe vettük a szerszámkatalógus ajánlását, a szerszám gép tulajdonságait és az orsó fordulatszám lehetséges változtatását, illetve maximális értékét. A fogásmélység $a_p=0.3$ mm és a fogás szélesség $a_e=0.25$ mm volt. A fogásmélység állandósága érdekében előmunkálást végeztünk gömbvégű marással.

A tesztfelületeket iránypárhuzamos, váltakozó irányú (zig-zag) 3D felületmarási módszerrel, az x tengelyhez viszonyítva öt különböző előtolási irányban munkáltuk meg. Az előtolási irányok $A_f = 0^\circ, 22^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ voltak.

Az első tesztcsoport esetében állandó orsófordulatszámot alkalmaztunk, az orsó fordulatszáma

$n=2000$ 1/min, az előtolási sebesség pedig $v_f=500$ mm/min volt. A második vizsgálati sorozat esetében az orsó fordulatszámát és az előtolási sebességet a szerszám-pálya mentén módosítottuk, figyelembe véve a tényleges forgácsolási átmérőt. A fordulatszám módosítás eljárását a következő fejezet ismerteti részletesen.

3 FORDULATSZÁM SZABÁLYOZÁS MEGVALÓSÍTÁSA

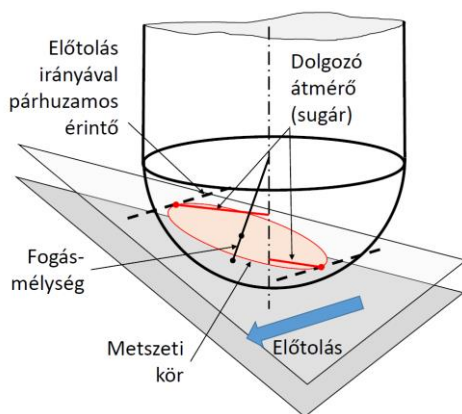
A gömbvégű szerszámmal végzett szabad formájú felületek marása az egyik leggyakrabban alkalmazott technológia a simítás során. Alapvetően a forgó marószerszám követi a felületet (előtolási sebesség, v_f), és a felület határán történő oldalirányú ellépés (a_p) után visszafordul. Ez a stratégia alkalmas elősimításra és nem alámetszett görbült felületek simítására CNC marógépen.

Gömbvégű maróval történő marás során a forgácsolás körülményei a felület változásával folyamatosan változnak. Az egyenletes forgácsleválasztás feltételei a felület és a szerszám változó helyzete miatt nem adóttak. Ennek hatása több tényezőt is megfigyelhető.

A forgácsolás során a szerszám helyzete és az előtolás irányának függvényében változik a forgács elméleti mérete és így a forgácsoló erő értéke. Ezzel párhuzamosan változik a szerszám forgácsoló (dolgozó) átmérője, ami az állandó főorsó fordulatszám miatt változó forgácsolási sebességet eredményez, ami kihatással van a kialakuló felület érdességére. Ennek következtében a változó felület érdessége inhomogén lesz. A szerszám dolgozó átmérőjének változása a szerszám döntésével kiküszöbölhető, ami azonban már 5D-s marási technológia alkalmazását jelenti.

A gömbvégű szerszám dolgozó átmérőjét a geometriai viszonyok elemzésével lehet meghatározni. Ennek során a következő tényezőket kell figyelembe venni:

- a szerszám névleges átmérője,
- a felület meredeksége,
- az előtolás iránya,
- a fogásmélység nagysága és a
- fogásszélesség iránya.



5. ábra: Gömbvégű maró dolgozó átmérője.

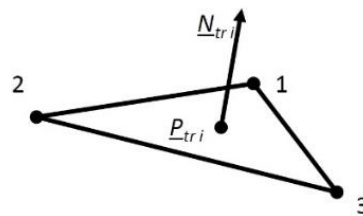
A szabad formájú felületet lokálisan síkkal helyettesítve a fogásmélységgel eltolt sík felület egy kört metsz ki a gömbvégű maró burkoló felületéből, melynek helyzete a felületi normális helyzetétől függ (5. ábra). A dolgozó átmérőt meghatározó pont ezen a körön lesz. A pont helyzete a szerszám előtolási irányától és a fogásvétel irányától függ, az előtolás irányú érintő jelöli ki. Az

aktuális dolgozó átmérőt e pont és a szerszám tengelyének távolság kétszerese adja. Ez alapján, amennyiben ismerjük ezen adatokat, a dolgozó átmérőt minden egyes pontban kiszámolható [6].

A számítási algoritmus felhasználható egy meglévő CNC program módosítására, vagyis megvalósítható a dolgozó átmérő függvényében változó főorsó fordulatszám beállítása és így állandó forgácsoló sebesség biztosítása.

A CNC program tartalmazza a szerszám-pálya pontjainak koordinátáit, illetve a forgácsolási paramétereket. A szerszám-pálya CNC programban szereplő pontjai szabad formájú felület esetén általában nem egyeznek meg a felület pontjaival, de ez az alkalmazás szempontjából csak kis mértékű hibát eredményez. A megmunkálási program esetén az APT fájlformátumot választottuk, ami nem kötődik CNC vezérlőhöz és a CAM rendszerekben általánosan használt köztes fájlformátum, melyből a posztprocesszor a vezérlés orientált CNC programot előállítja. Így a módosított APT fájlt továbbra is posztprocesszálható. Az APT formátum ASCII kódolású, ami egyszerűsíti a feldolgozást és a módosítást is.

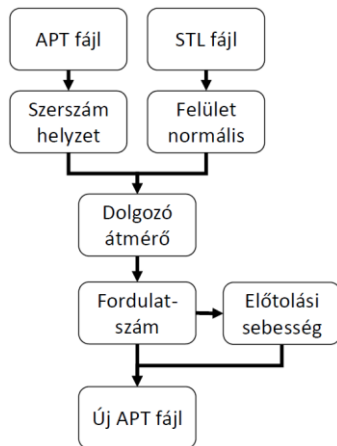
A felületi normális meghatározásához a megmunkálandó felület geometriai modelljére van szükségünk. A fejlesztés során az STL fájlformátumra esett a választásunk. Az STL formátumot gyors prototípus gyártási eljárásokhoz fejlesztették ki a felület leírásához. A felületeket háromszögekre bontja az algoritmus megadott megengedett hibával, a fájl a háromszögek csúcspontjainak koordinátáit, valamint a háromszög normálisának koordinátáit tartalmazza ASCII formában (6. ábra).



```
SOLID PRT0002
facet normal 0.000e+00 0.000e+00 -1.000e+00
outer loop
vertex 0.000e+00 5.000e+01 0.000e+00
vertex 5.000e+01 0.000e+00 0.000e+00
vertex 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
endloop
endfacet
...
ENDSOLID PRT0002
```

6. ábra: STL fájlformátum

Az általunk fejlesztett algoritmus minden szerszám-pálya ponthoz megkeresi a legközelebbi háromszöget a háromszög középpontja alapján és annak normálvektorát használja a számítás során. A forgácsolási sebességből és az aktuális dolgozó átmérőből a szükséges főorsó fordulatszám meghatározható, és ennek értékét a CNC programba az adott mondathoz hozzá írja az eljárás (7. ábra).



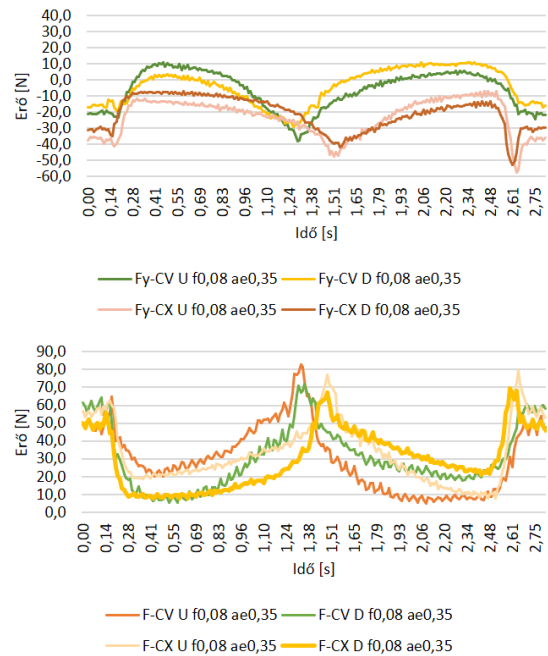
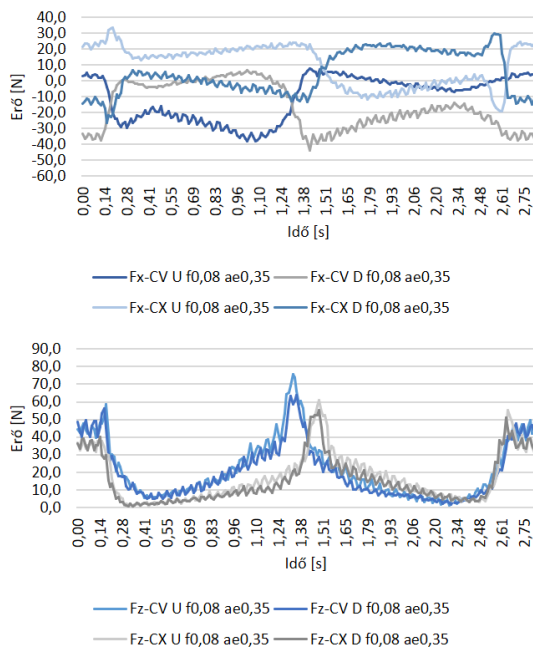
7. ábra: A fordulatszám szabályozás folyamatábrája.

4 EREDMÉNYEK

4.1 Forgácsolási erő változása

A marás során fellépő erők időbeni változását az 1 jelű beállítás esetén ($f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm) ismertetjük. Az egyes erő összetevők jellege az összes beállítás esetén hasonló. A részletes elemzést [7] tartalmazza.

Mivel a forgácsolás y irányban történt, az F_x , x irányú erőkomponens a passzív erő, az F_y , y irányú komponens az előtolás irányú erő, az F_z , z irányú komponens a szerszám tengely irányú (axiális) erő. A három erőkomponens vektor összege a forgácsolási erő (F_c). A diagrammok egy szerszámút esetén mutatják az erők időbeni változását (8. ábra).

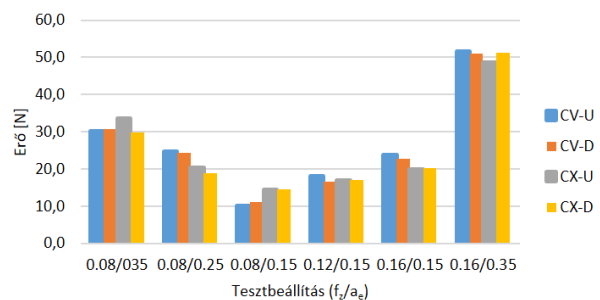


8. ábra: Forgácsoló erőkomponensek változása ($f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm)

Mindegyik diagram esetén jól látható a felület változásának hatása. A felületek inflexiós pontjánál változik az erő jellege. A passzív erő (F_x) esetén változik az erő iránya, valamint az ellen- (U, y+ irányú előtolás) és egyenirányú (D, y- irányú előtolás) marás esetén a diagramok közel szimmetrikusak. Az F_x erő bizonyos szakaszokon 0 érték körül ingadozik.

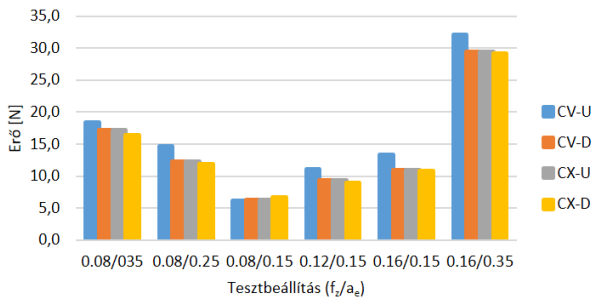
Az előtolás irányú erő (F_y) esetén az egyenes szakasznál van szélső értéke az erőnek, majd az inflexiós pont közelében szintén. Az axiális erők (F_z) esetén a jelleg hasonló, de a változás nagyobb mértékű. Mindhárom erőkomponens esetén a vízszintes részt elhagyva az erők gyors csökkenése figyelhető meg, majd az inflexiós ponthoz közeledve lassan növekszik az értékük. A homorú (CV) felület esetén a maximum az inflexiós pont előtt, a domború (CX) felület esetén kicsit utána van az erő maximum. Az eredő forgácsolási erő jellegét és nagyságát az axiális erő határozza meg.

Az eredő erők átlag értékeit a 9. ábra mutatja. Mint látható, az egyen- és ellenirányú marás, valamint a homorú és domború felület esetén a különbségek kismértékűek, az előtolás és a fogásszélesség nagyobb hatást gyakorol a forgácsolási erőre. A diagramból az is látszik, hogy a fogásszélesség nagyobb hatással van az eredő erőre, mint az előtolás. A legnagyobb érték természetesen a vizsgált maximális paramétereknél van.



9. ábra: Átlagos forgácsolóerő

Egy pálya mentén az erő értékének változását a szórással jellemezhetjük. Mint a 10. ábra mutatja, követi az erő esetén tapasztalt tendenciákat. A szórás relatív értéke 43-62%, ami azt jelzi, hogy jelentősen változik az erő a szerszám pálya mentén.



10. ábra: A forgácsolóerő szórása

A marópálya mentén CAD modellezés segítségével meghatároztuk a forgács térfogatát és az elméleti átlagos vastagságát. Marás során, a szakaszos forgácsleválasztás, valamint a szerszám és a felület helyzetének változása miatt, a forgács vastagsága változik. Gömbvégű marás esetén ez két irányú változást jelent. CAD modellezéssel kiserkesztettük azt a térfogatot, melyet a szerszám burkoló térfogata, egy fogankénti előtolás távolság alatt kimetsz az elősimított darab térfogatából. Az elméleti forgácsvastagság ennek a kimetszett elem térfogatának és a forgácsoló szerszámmal érintkező felületének a hányadosa [8].

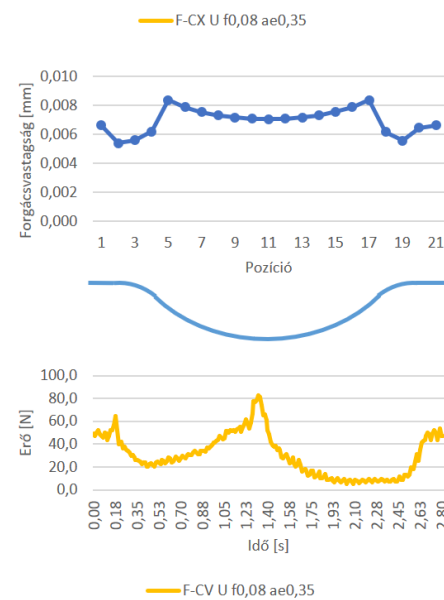
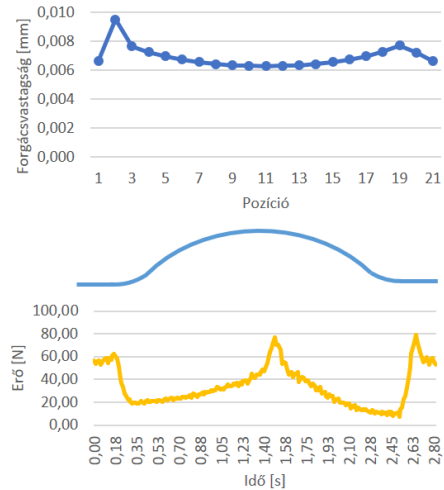
Az 1. beállítás esetén az értékeket a 11. ábra mutatja. A felület változását, a forgácsvastagság változását és a forgácsolóerő változását összevetve megállapítható, hogy az erő értékére nem csak a forgácsvastagság van hatással, mivel a felület középső szakaszán tapasztalt erőnövekedést nem indokolja a forgácsvastagság változása.

Az erő növekedését a forgácsolási viszonyokban történő változásokban kell keresni. A vízszinteshez közel álló felület szakaszokon a szerszám csúcsa (kereszt éle) is dolgozik. Azonban itt a kis átmérő miatt a forgácsolási sebesség 0 körüli, valamint az él kialakítása miatt a forgácsleválasztás korlátozott. Ebből következően a forgács leválasztása mellett megnő az alpanyag rugalmas és képlékeny deformációja, ami a szerszámmra ható erő növekedésében mutatkozik meg.

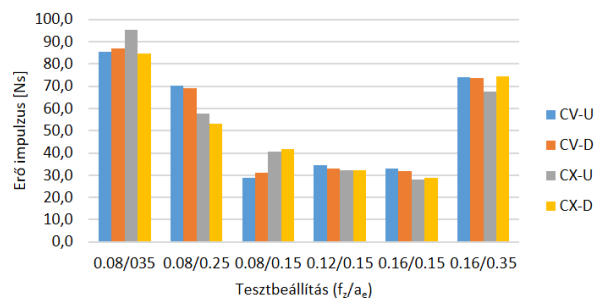
4.2 Erő impulzus

Az egyes beállítások esetén a megmunkálási idő eltér. Ennek hatását mutatja az erő impulzus, ami az erő-idő függvény alatti területe. Az erőimpulzus alkalmas eszköz a változó forgácsolási körülmények között mért erő értékek összehasonlítására.

Az erő impulzus értéke egyszerre veszi figyelembe az erő nagyságát, változását és a megmunkálás idejét. A 12. ábra 1-1 szerszám pálya esetén mutatja az értékeket. Az előtolás csökkentésével (1-2-5 beállítás) az érték csökken, majd a fogásszélesség növekedése (5-4-3 beállítás) okozta erőnövekedést a rövidebb marási idő kompenzálja. Az utolsó, maximális értékeket tartalmazó beállítás esetén (6) a nagy erő értékeket kompenzálja a nagyon rövid marási idő, így az erő impulzus értéke kisebb, mint az 1. beállítás esetén.

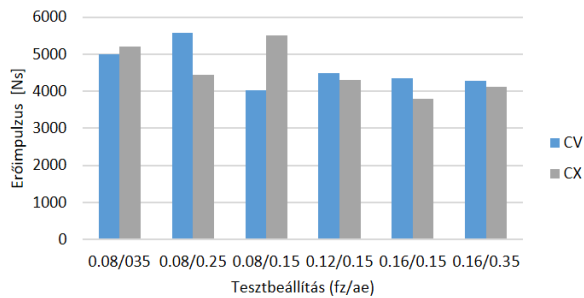


11. ábra: Forgácsvastagság és forgácsolóerő (CX-CV; $f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm)

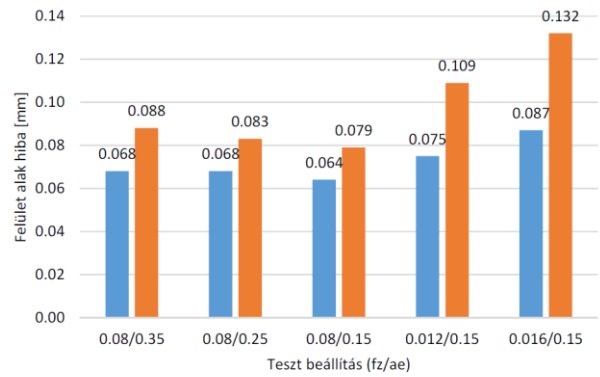


12. ábra: Erőimpulzus egy szerszám pálya esetén

A teljes felületre számolva az erő impulzus értékét az ellen- és egyenirányú pályaszakaszokat egyszerre kell figyelembe venni. Az értékek (13. ábra) az 1. beállítás esetén nagyobbak. A 2. és 5. beállítás esetén a konkáv és konvex felületre meghatározott értékek jelentősen eltérnek. Az 5-3-4-6. beállítások esetén lényegében azonos értékeket kapunk.



13. ábra: Erőimpulzus a felületen

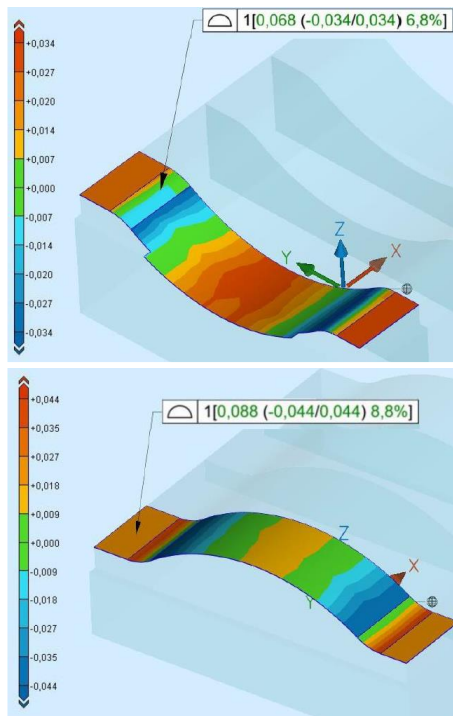


15. ábra: Felületi profilhiba

4.3 Alakhiba

A felület alak hiba egy sáv vastagságát jelenti, mely az elméleti felület szimmetrikus eltolásával jön létre és közrefogja a gyártott felületet.

A 14. ábra az 1. beállításhoz tartozó felületek esetén mutatja a felület alaktüresein belüli eltéréseket. Ezek az eltérések jól követik a forgácsolási erő alakulását, a vízszintes kezdő és záró szakaszoknál, illetve a felület közepén, ahol az erő maximális értékét mértük (11. ábra). A felület eltérése ezeken a szakaszokon a legnagyobb pozitív irányba. Az átvezető rádiusznál, ahol az erő lecsökken, a felület nagy negatív eltérést mutat.



14. ábra: Felületi profilhiba térkép (CV-CX; $f_z=0.08$ mm; $a_c=0.35$ mm).

Az egyes felületek alakhibáját a 15. ábra mutatja, ezek értéke 0.06 mm és 0.14 mm közé esik. Mint látható a konvex felületek hibája nagyobb, annak ellenére, hogy az eredő erő átlagértékeiben nagy különbséget nem tapasztaltunk.

Míg az erők esetén a fogásszélesség mutat nagyobb hatást, a geometriai hiba az előtolás növelésével nőtt nagyobb mértékben.

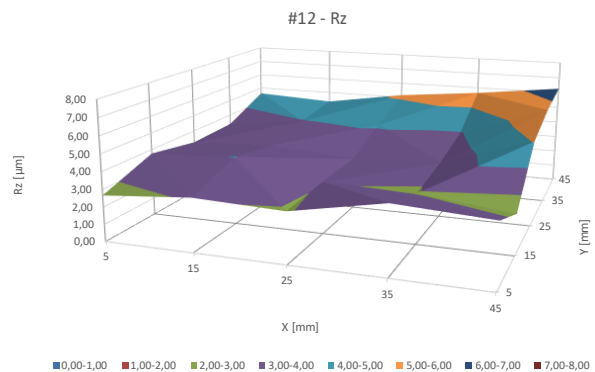
4.4 Felületi érdesség

A felületi érdesség változásának vizsgálata a 2 jelű testtátrakészen történt. A kutatás során az Rz érdességi paramétert paraméterét vizsgáltuk és hasonlítottuk össze.

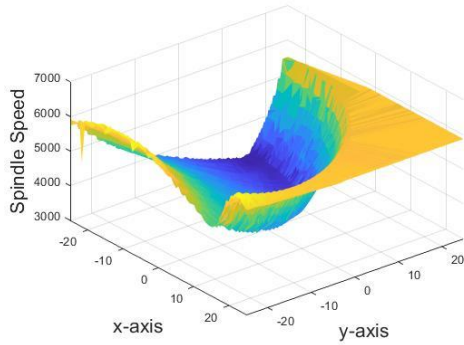
Az összes mért Rz adat (5 előtolási irány x 25 szakasz x 3 ismétlés) átlagértéke állandó főorsó fordulatszám esetén 4.1 μ m, a szórás pedig 1.3 μ m. Szabályozott (kompenzált) főorsó fordulatszám esetén az átlagérték 1.7 μ m, a szórás pedig 0.4 μ m. Az eredmények azt mutatják, hogy a szabályozott orsófordulatszám és az állandó fogankénti előtolás homogénebb felületi érdességet eredményez, az Rz átlagértéke kisebb és a szórás is kisebb. Ha a tényleges forgácsolási sebesség nem lenne hatással a felületi érdességre, akkor az Rz értékeknek 5 különböző előtolási irány esetén azonosnak kellene lenniük, amit a szórás kis értéke jelezne.

A 16. ábra a felületi érdességet mutatja az $A_f=22.5^\circ$ marási irány esetén. Az első diagram állandó főorsó orsófordulatszámú marási folyamat, a második állandó forgácsolási sebesség (szabályozott főorsó fordulatszám) esetén ábrázolja az érdességet. A 17. ábra a felület marás során alkalmazott főorsó fordulatszámot mutatja. Az eredmények részletes elemzését [9][10] tartalmazza.

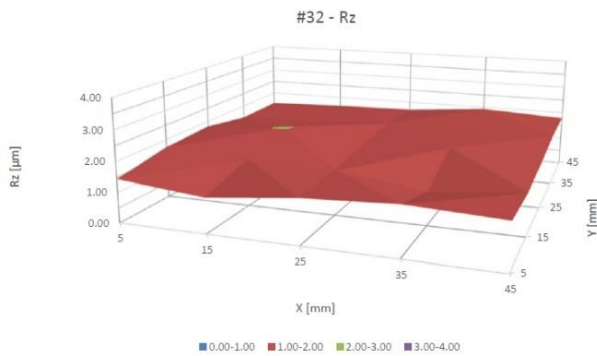
A diagramok alapján a felületi érdesség értékei szabályozott főorsó fordulatszám esetén kisebbek, és a felület mentén történő változás is minden esetben kisebb. A nagyobb felületi érdesség értékek a nem szabályozott marás esetén a vízszintes felületi szakaszokon található, ahol a megmunkálási átmérő és így a forgácsolási sebesség csökken. A szabályozott paraméterek esetén a felületi térkép simább, a különbségek kisebbek (18. ábra).



16. ábra: Felületi érdesség állandó főorsó fordulatszám mellett ($A_f=22.5^\circ$).



17. ábra: A fordulatszám kompenzált értékei $A_f=22.5^\circ$ marási irány esetén.



18. ábra: Felületi érdesség állandó forgácsolási sebesség mellett ($A_f=22.5^\circ$).

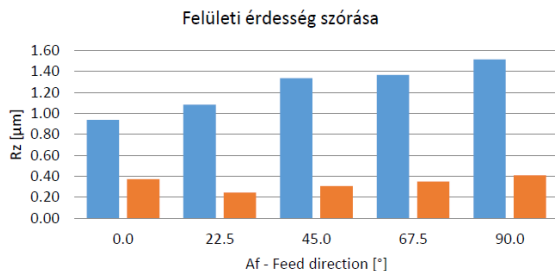
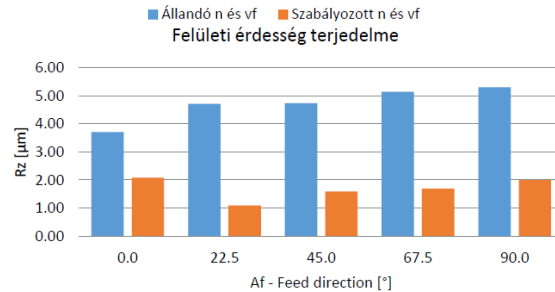
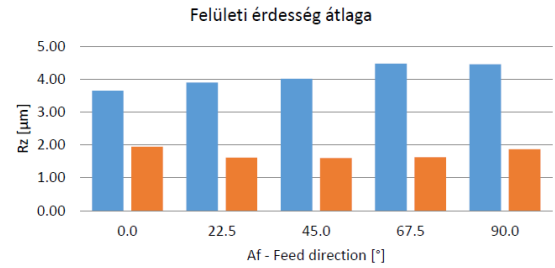
A felületi érdesség statisztikai adatainak összehasonlítása megerősíti a szabályozott orsófordulatszám hatását a felületi érdesség változására.

Az 19. ábra az Rz felületi érdesség átlagos értékeit hasonlítja össze az egyes marási irányok esetében. Állandó orsófordulatszám mellett marás során $4.5 \mu\text{m}$ ($A_f=67.5^\circ$) és $3.7 \mu\text{m}$ ($A_f=0^\circ$) között változnak az átlag értékek, míg a módosítás utáni Rz felületi érdesség értékek $2.0 \mu\text{m}$ ($A_f=0^\circ$) és $1.6 \mu\text{m}$ ($A_f=45^\circ$) között.

A forgácsolási sebesség állandó értéken tartása csökkenti a marási irány hatását a felület minőségére, ami hasonló felületi érdességet biztosíthat különböző marási irányok mellett, és homogénebb felületet biztosíthat a felületi dőléstől függetlenül.

Az Rz paraméter terjedelme (a maximális és a minimális értékek különbsége) $1 \mu\text{m}$ -tól körülbelül $2 \mu\text{m}$ -ig tart a szabályozott paraméterekkel mart felület esetében, a előtolási iránytól függően. Hagyományos marási módszerrel (állandó orsófordulatszám) a tartományok $3.7 \mu\text{m}$ és $5.3 \mu\text{m}$ között vannak mindkét irányban. A kisebb tartomány a homogénebb felületi minőséget jelzi.

A szabályozott paraméterekkel megmunkált munkadarabok szórása kisebb (kevesebb, mint $0.4 \mu\text{m}$), mint az optimalizálás nélkül megmunkáltaké, amelyek 1 és $1.5 \mu\text{m}$ között mozognak. A szórásnak ez a kis értéke azt jelenti, hogy a megmunkálás után a felület érdessége közel azonos a teljes felületen. Ez az eredmény különböző marási irányok mellett is azonos. A szórás hasonló értéke kiemeli azt, amit korábban megállapítottunk, hogy a javasolt módszerrel történő marás kiküszöbölheti a marási irány hatását.



19. ábra: Felületi érdesség adatai az öt marási irány függvényében állandó és szabályozott fordulatszám mellett.

5 KÖVETKEZTETÉSEK

A szabad formájú felületek gömbvégű marással történő megmunkálásakor a felület geometriai változásai miatt, a forgácsolás körülményei változnak. A szerszám-pálya létrehozásához CAM-rendszert szükséges használni, amely biztosítja a felület méret- és alakpontosságát, valamint a megfelelő felületi érdességet. A minőségi követelmények kombinációja csak a megfelelő mozgásstratégia, szerszámgeometria és marási paraméterek kiválasztásával lehetséges.

Kísérletek során vizsgáltuk a forgácsoló erő és a felületi érdesség változását, valamint szimuláció segítségével a forgács alakot és méretet.

Az ismertetett forgácsolási kísérletek alapján megállapítható, hogy

- (1) a forgácsolóerő a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik;
- (2) a marási erő változását követi a mart felület geometriai pontossága;
- (3) az erőimpulzus hatékonyan használható a megmunkálási paraméterek által okozott erő- és megmunkálási időváltozások hatásának összehasonlítására;
- (4) az erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló élszakaszának körülményei is;

(5) amikor a szerszám csúcsa részt vesz a megmunkálásban (vízszinteshez közeli felületek), a forgácsolóerő jelentősen megnő, az alakeltéréssel egyetemben;

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a gömbvégű szerszámmal történő szabad formájú felületek simító megmunkálásához olyan marási stratégiát kell választani, amelyben a szerszám csúcsa nem vesz részt a megmunkálásban a forgácsolóerő és az alakeltérés csökkentése érdekében.

Fontos következtetés, hogy a forgácsolóerő számításal történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez is jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

Szabad formájú felület gömbvégű maróval történő megmunkálása során a változó dolgozó átmérő és forgácsolási sebesség a főorsó fordulatszámának kompenzálásával közel állandó értéken tartható. A bemutatott kompenzációs algoritmus a szerszám pályát leíró APT formájú fájl és a felületet leíró STL formátumú fájl adatai alapján folyamatosan módosítja a fordulatszám és az előtolási sebesség értékét az állandó marási körülmények fenntartása érdekében.

A kísérletek alapján a főbb következtetések a következők:

- (1) A marási tesztek a felületi érdesség javulását mutatják, amikor az alkatrészeket állandó forgácsolási sebességgel marjuk. A felületi érdesség átlagértéke és szórása csökkent.
- (2) Szabályozott orsófordulatszámmal történő marás esetén a felületi érdesség kevésbé függ a marási iránytól, amit a kisebb szórás is jelez.
- (3) A szabályozott orsófordulatszám alkalmazása nagyobb dinamikus igénybevételt jelent a szerszámgépre. Az orsó fordulatszám pálya szerinti integrálértéke jelzi az orsó dinamikus terhelését, amely alkalmas a leghatékonyabb marási irány kiválasztására.

A bemutatott módszer alkalmas a szabad alakú felület CNC maróprogramjának utófeldolgozására a forgácsolási sebesség kompenzálására, ami javítja a felület minőségét és vizuális megjelenését.

A módszer tovább finomítható, figyelembe véve a CNC megmunkálóközpont főhajtásának dinamikai tulajdonságát. Az algoritmus továbbfejlesztése során cél a fordulatszám változásának csökkentése a szerszám pálya módosításával. Így módon kombinálható a szerszám pálya tervezés és a dolgozó átmérő változásából adódó sebesség hatás kompenzálása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a kísérletek és mérések kivitelezésében nyújtott segítségért a Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék két munkatársának, Ráczai Viktornak és Nagy Jánosnak.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Zebala W., Plaza M. (2014) Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form machining of difficult-to-cut material. *Int. J. Production Economics.* 158:345-358; <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.08.006>
- [2] Sadílek M., Poruba Z., Cepová L., Šajgalík M. (2021) Increasing the Accuracy of Free-Form Surface Multiaxis Milling. *Materials.* 14(1):25; <https://doi.org/10.3390/ma14010025>

- [3] Mali R.A., Gupta T.K.V., Ramkumar J. (2021) A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade. *J. Manufacturing Processes.* 62:132-167; <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>
- [4] Sun Y. et.al (2021) Path, feedrate and trajectory planning for free-form 5 surface machining: A state-of-the-art review. *Chinese J. Aeronautics.* 35(8):12-29; <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.06.011>
- [5] Grešová Z., Ižol P., Maňková I. Vraběl M. (2021) The effect of cutter path strategies on surface roughness when machining titanium alloy. *J. Production Engineering.* 24(2):9-12; <https://doi.org/10.24867/JPE-2021-02-009>
- [6] Mikó B., Zentay P. (2019) A geometric approach of working tool diameter in 3-axis ball-end milling. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology.* 104(1-4):1497-1507 <https://goi.org/10.1007/s00170-019-03968-9>
- [7] Varga B.; Mikó B. (2023) Investigation of the cutting force and surface profile error when free form milling. *Acta Technica Jaurinensis.* 16(1):27-33 <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00685>
- [8] Varga B.; Mikó B. (2022) CAD modelling of the chip shape in case of ball-end milling. *Mérnöki és Informatikai Megoldások/Engineering and IT Solutions* 3(2):30-38 <https://10.37775/EIS.2022.2.3>
- [9] Mgherony A.; Mikó B. (2023) Controlling the spindle speed when milling free-form surfaces using ball-end milling cutter. *Acta Polytechnica Hungarica* 20(6):135-149 <https://doi.org/10.12700/APH.20.6.2023.6.8>
- [10] Mgherony A.; Mikó B. (2023) The effect of the spindle speed control when milling free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 130(3-4):1439-1449 <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12811-1>