

AZ ELMÉLETI ÉRDESSÉG ANALITIKUS MODELLEZÉSE NÉHÁNY JELLEGZETES GÉPIPARI MEGMUNKÁLÓ ELJÁRÁSNÁL

Felhő Csaba 

intézetigazgató, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: csaba.felho@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk témája az elméleti felületi érdesség analitikus modellezése különböző megmunkálási eljárásoknál. Négy különböző megmunkálási mód segítségével előállított felület esetére kerülnek bemutatásra az elméleti profil analitikus számításához szükséges lépések: esztergálás, homlokmarás, gyémántvasalás, valamint köszörülés. Ezek közül az első háromnál a Gyártástudományi Intézet fő kutatási területeihez tartozott az elméleti érdesség modellezése az utóbbi évtizedben, míg a köszörült felületek modellezése egy új iránynak tekinthető, amely várhatóan a következő években fog beérni. Az egyes eljárásoknál ismertetésre kerülnek a módszerek főbb lépései, valamint az első háromnál a számított eredmények valós kísérletek során mért adatokkal is összehasonlításra kerülnek.

Kulcsszavak: elméleti érdesség, esztergálás, homlokmarás, gyémántvasalás, köszörülés.

Abstract

The topic of the article is the analytical modeling of the theoretical surface roughness in different machining processes. The steps required for the analytical calculation of the theoretical profile are presented for the case of a surface produced using four different machining methods: turning, face milling, diamond burnishing, and grinding. For the first three of these, theoretical roughness modeling was one of the main research areas of the Institute of Manufacturing Science in the last decade, while the modeling of ground surfaces can be considered a new direction, which is expected to mature in the coming years. The main steps of the methods are described for each procedure, and the calculated results for the first three are also compared with data measured during real experiments.

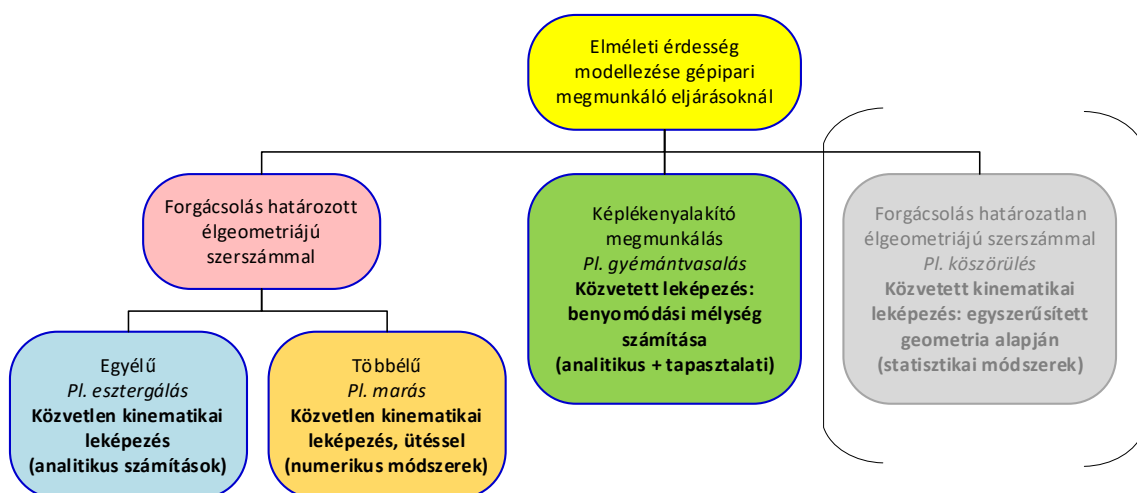
Keywords: theoretical roughness, turning, face milling, diamond burnishing, grinding.

1. Bevezetés

A gépipari megmunkáló eljárások fő célja olyan gépalkatrészek gyártása, amelyek megfelelnek a működési követelményeknek. Ez a megfelelés viszont számos tényezőtől függ, amelyek közül az egyik a felületi érdesség előírt értékének a biztosítása. A megmunkált felületek érdessége szintén több faktoros jellemző: egyrészt az alkalmazott megmunkáló eljárásra jellemző geometriai-kinematikai viszonyokból adódik egy alap érdesség, amelyre a forgácsoló szerszám saját érdessége és a rendszer dinamikus hatásaiból eredő egyenetlenségek is hozzáadódnak. Így adódik ki a megmunkált felület tényleges érdessége. Az elméleti érdesség számítására többféle módszert dolgoztak ki a kutatók, amelyeknek egy célszerű csoportosítási lehetősége került bemutatásra Benardos és Vosniakos cikkében (Benardos et al., 2003). Ez alapján megkülönböztethetünk: 1) forgácsoláselméleten alapuló megközelítéseket, amelyeknél ana-

litikus modelleket és/vagy számítógépes algoritmusokat dolgoznak ki a megmunkált felület ábrázolására; 2) olyan módszereket, amelyek a különböző tényezők hatásait vizsgálják forgácsolási kísérletek végrehajtása és az eredmények elemzése által; 3) kísérlettervezési eljárásokat alkalmazó megközelítéseket és 4) mesterséges intelligenciát alkalmazó módszereket. Ezen cikkben egyes jellegzetes gépipari megmunkálási eljárások analitikus és numerikus modellezési lehetőségeit mutatjuk be, amelyekkel a Gyártástudományi Intézetben az utóbbi évtizedben foglalkozott a szerző. Az alkalmazott módszerek minden esetben hasonlóak, ugyanakkor figyelembe kell venni az egyes eljárások közötti geometriai-kinematikai különbségeket. A gépipari megmunkálásokról megkülönböztethetünk (többek között) forgácsoló és képlékenyalakító megmunkálásokat, ahogy azt az 1. ábra is mutatja. A forgácsoló eljárásokat pedig tovább bonthatjuk határozott- illetve határozatlan élgeometriájú szerszámokkal végzett megmunkálásokra. Határozott élgeometria esetén viszonylag egyszerűen lehet a geometriai-kinematikai érdességet számítani, mivel ismert a forgácsoló szerszám geometriája. Amennyiben többélű szerszámmal végzett forgácsolásról van szó (pl. marás), akkor ezen túlmenően az egyes forgácsoló élek eltéréseit is figyelembe kell vennünk. Határozatlan élgeometriával rendelkező szerszámmal végzett megmunkálásoknál, mivel a konkrét geometriája az abrázív forgácsoló szemcséknek nem ismert, így valamilyen egyszerűsített, egységes geometriát (pl. háromszög, kör) szoktak feltételezni, és ennek a segítségével határozzák meg az elméleti érdességet analitikus számítások alkalmazásával. Ugyanakkor azt is figyelembe kell venni, hogy mind a szemcsék alakja, mérete, mind pedig azok elhelyezkedése véletlenszerű, tehát célszerűnek tűnik a sztochasztikus módszerek alkalmazása. A negyedik csoportot az ábrán pedig az olyan képlékenyalakító eljárások alkotják, mint például a gyémántvasalás. Itt a folyamat jellegéből adódóan szintén csak közvetett módon lehetséges az elméleti érdesség analitikus meghatározása: a szerszám és a munkadarab anyagjellemzői, azok geometriája, illetve az alkalmazott erő alapján kiszámítják a szerszám benyomódási mélységét a munkadarabba, amelynek a segítségével az egyélű forgácsolószerszámoknál alkalmazott számítások felhasználhatóvá válnak ezen eljárásnál is.

A továbbiakban az egyes, itt felsorolt esetek kerülnek röviden bemutatásra. Az ismertetendő munkák nagy része a Gyártástudományi Intézetben került kidolgozásra, illetve alkalmazásra az elmúlt években, egyedül a köszörült felületek analitikus modellezése az a terület, amelynél a kutatások éppen csak elkezdődtek, és elsősorban a jövőbeli kutatások tárgyát fogja képezni. Az egyes módszereknek csak az elvi alapjait közöljük, a részletesebb leírásokat, egyenleteket a hivatkozott munkák tartalmazzák.



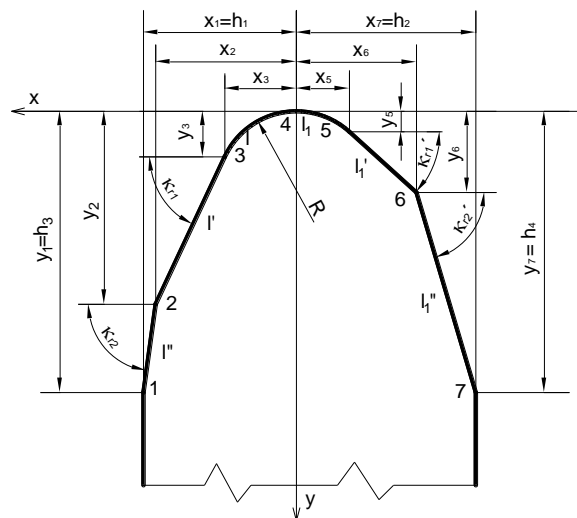
1. ábra. Elméleti érdesség meghatározásának lehetőségei néhány jellegzetes megmunkáló eljárásnál

2. Forgácsolás határozott élgeometriájú szerszámokkal

Határozott élgeometriával rendelkező forgácsoló szerszámokkal végzett megmunkálásnál az elméleti érdesség meghatározása közvetlen kinematikai leképezéssel elvégezhető. A korábbi kutatásaink során (Felhő, 2014; Felhő et al., 2014; Kundrák et al., 2018) elsősorban az esztergálással és a homlokmarással foglalkoztunk, amelyek során megállapítottuk, hogy bár az alkalmazott modellezési eljárások hasonlóak, az egyes eljárások között azonban elég jelentős kinematikai eltérések vannak, amelyek az elméleti érdesség modellezésénél szintén jelentős különbséget jelentenek. A következőkben elsősorban ezen különbségek szemléltetésére koncentráltunk.

2.1. Egyélű szerszámmal végzett forgácsolás

Az elméleti érdesség számítása esztergálás esetére kerül ismertetésre. Hosszesztergálásnál – mint a leggyorsabb eljárásváltozatnál – a munkadarab forog, a szerszám végzi a tengelyirányú lineáris előtoló mozgást. A kettő kombinációjából, illetve a szerszám alakjának a figyelembevételével viszonylag egyszerűen kiszámítható az elméleti érdesség értéke analitikus számításokkal. Kundrák által kidolgozásra került egy olyan számítási módszer (Kundrák, 1996), amelynek a lényege, hogy egy általános matematikai modell alapján, analitikus számítások segítségével határozta meg az adott szerszámgeometria által létrehozott elméleti érdességi profilt. Az általános szerszámprofil jellegzetes pontjait a 2. ábra mutatja. A modellt egy x-y koordináta rendszerbe helyezve (ahol a szerszám csúcsa található az origóban) az egyes élszakaszok egyszerű geometria elemek segítségével leírhatóak.



2. ábra. Az általános szerszámprofil jellegzetes pontjai (Kundrák, 1996)

Ezután a szerszámot az előtolás értékével eltolva meghatározhatóak az eredeti és az eltoló profil metszéspontjai, ahogy az a 3. ábrán is látható. Az ábra arra az esetre mutatja az elméleti érdesség számításához szükséges profil középvonal számítását, amikor $y_p < a_p$, tehát az eredeti és az előtolás értékével eltoló szerszámprofil metszéspontjának y-koordinátája kisebb a fogásmélység értékénél. Ilyenkor az R_t teljes profilmagasság értéke egyenlő az y_p -vel. Ellenkező esetben, amikor $y_p > a_p$, akkor $R_t = a_p$, mivel a fogásmélység lekorlátozza az érdességi profilt. A konkrét egyenletek itt most nem kerülnek ismertetésre, azok a korábbi munkáinkban megtalálhatóak (Kundrák, 1996; Felhő, 2014). Látható azonban az

ábrán, hogy egy felső ($T_{m,up}$) és egy alsó ($T_{m,low}$) profilterület kerül meghatározásra, és a közép vonal (m) számításánál ezen két terület egyenlőségét vesszük alapul. A közép vonal ismeretében az Ra átlagos érdesség elméleti értéke meghatározható az alábbi képlet segítségével:

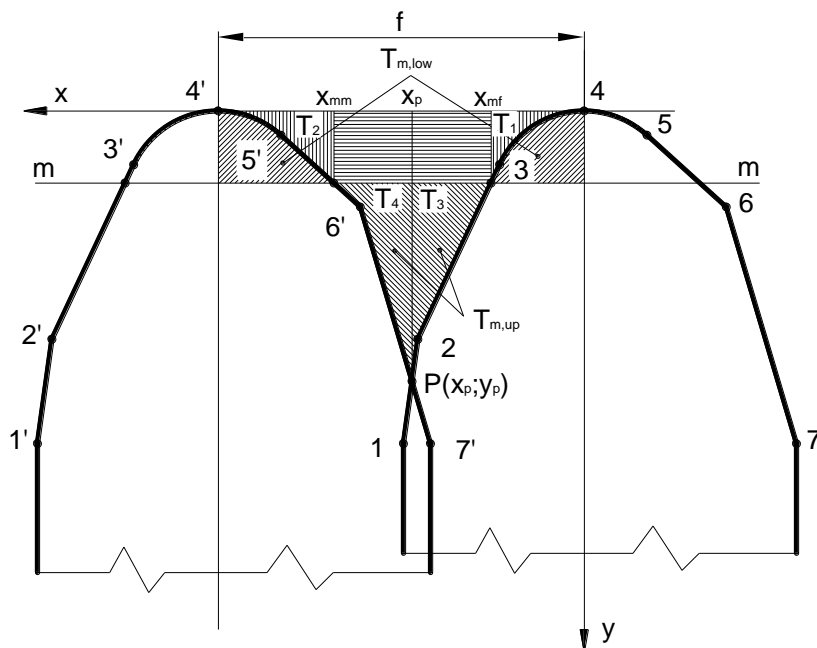
$$Ra = \frac{T_{m,low} + T_{m,up}}{f} \quad (1)$$

Az elméleti érdességi jellemzők közül a gyakorlatban még az Rz egyenetlenségi magasság paramétert szokták alkalmazni, amelynek az értéke viszont elméleti profil esetén (mivel az nem tartalmazza a megmunkálási folyamatból adódó dinamikus egyenetlenségeket) megegyezik az Rt -vel ($Rz = Rt$). További információval szolgál a felület működéséről az ún. hordozóhossz (angolul Material Ratio, RMR) paraméter, amely egy adott magasságban lévő metszévonal mentén adja meg az anyag-levegő arányból az anyagot tartalmazó rész százalékos értékét. Számítása a következő:

$$RMR = \frac{(x_{pm} - x_{pf})}{f} \cdot 100 \quad (2)$$

ahol:

- x_{mf} : a profil metszévonalnak a mellékével való metszéspontjának abszcissza értéke;
- x_{pf} : a profil metszévonalának a főével való metszéspontjának abszcissza értéke.



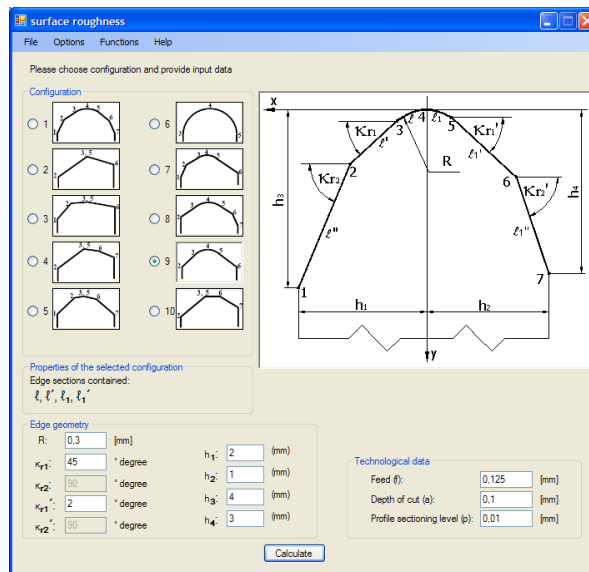
3. ábra. Az m közép vonal és az elméleti érdesség számítása $y_p < a_p$ esetén

Az ismertetett módszer felhasználásával elkészült egy olyan számítógépes szoftver, amely alkalmas az elméleti érdesség meghatározására a gyakorlatban legtöbbször alkalmazott elrendezésű egyenes és íves élszakaszokkal rendelkező forgácsoló szerszámok esetén. A szoftverben az adatbeviteli képernyőn

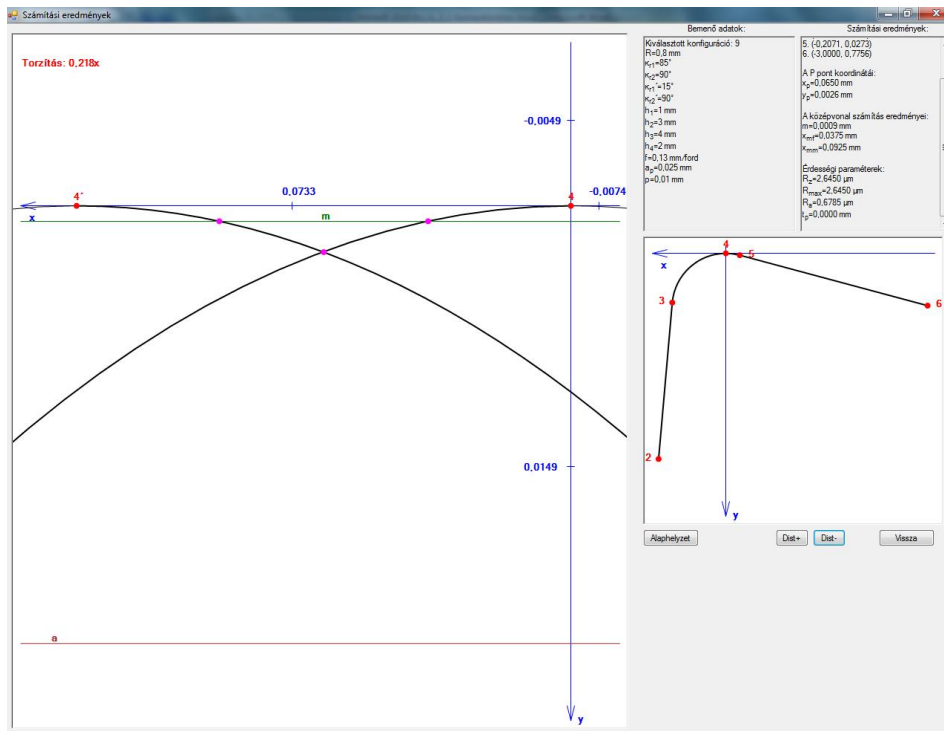
(4. ábra) a felhasználó kiválaszthatja a szerszám élkonfigurációját valamint a szükséges egyéb bemenő paramétereket, az alábbiak szerint:

- R : a lapka csúcsrádiusza [mm];
- κ_{r1} : a főél-fazetta elhelyezési szöge [°];
- κ_{r2} : a főél elhelyezési szöge [°];
- κ_{r1}' : a mellékél-fazetta elhelyezési szöge [°];
- κ_{r2}' : a mellékél elhelyezési szöge [°];
- h_1, h_2, h_3, h_4 : az élszakaszok befoglaló méretei (az ábra alapján) [mm];
- f : a fordulatonkénti előtolás [mm/fordulat];
- a : fogásmélység [mm];
- p : profil metszővonal a hordozóhossz számításához [mm].

A számítási eredményeket az 5. ábra által mutatott eredményképernyőn lehet megtekinteni. Itt egyrészt kirajzolásra kerülnek az egyes élszakaszok, a nevezetes pontok, metszéspontok, a profil középvonala, a fogásmélység értéke. Másrészről pedig a szoftver kiírja a számítások eredményeit is. Ezáltal a program jól alkalmazható az elméleti érdesség meghatározására esztergálásnál, de tulajdonképpen a hasonló relatív mozgásviszonyokkal rendelkező gyalulásnál is.

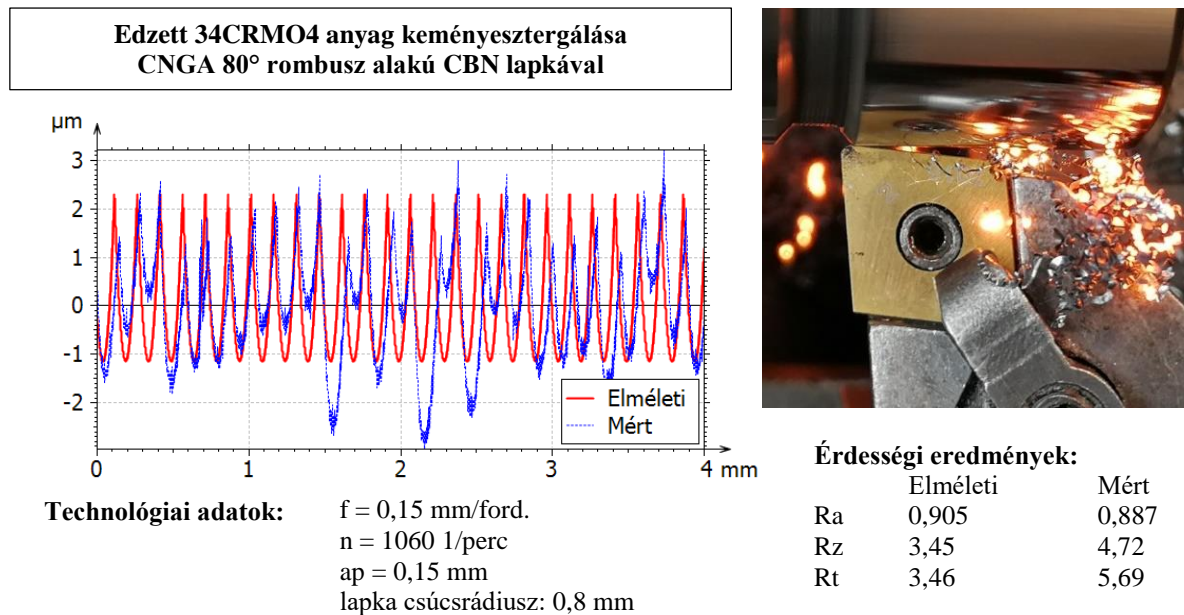


4. ábra. A bemenő adatok megadása az esztergált felület elméleti érdességének számítására készített szoftverben



5. ábra. Az esztergálásnál létrejövő elméleti érdességi profil számítására készített szoftver számítási eredményei

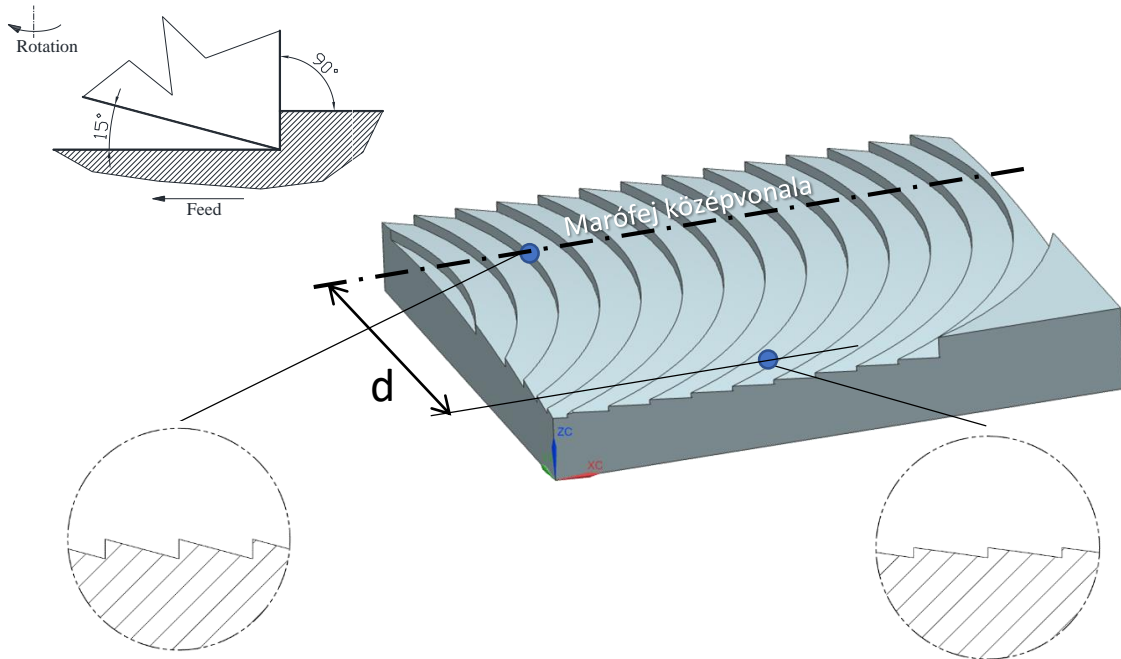
A 6. ábra az elkészített szoftver egyik lehetséges felhasználási módját mutatja be a (Felho et al., 2022) irodalomban ismertett munka alapján: keményesztergálási kísérleteket végeztünk a Gyártástudományi Intézet géplaborjában található EU 400-01 típusú egytetemes csúceszterga gépen. Ennek során edzett 34CrMo4 próbadarabokat forgácsoltunk 80° -os rombusz alakú CBN lapkával. Az alkalmazott technológiai paramétereket az ábrán tüntettük fel. Ezután mértük a forgácsolt felületek érdességét a Gyártástudományi Intézetben található AltiSurf 520 típusú felületi érdességmérő berendezés segítségével. A mért és az elméleti érdességi profilokat az AltiMap kiértékelő szoftver segítségével hasonlítottuk össze, a számszerű eredményeket szintén az ábrán adtuk meg. Látható, hogy az elméleti és a mért érdességi adatok viszonylag jól közelítik egymást, a valós profinnál jelentkező kisebb-nagyobb kiugrások a folyamat egyéb sajátosságait tükrözik.



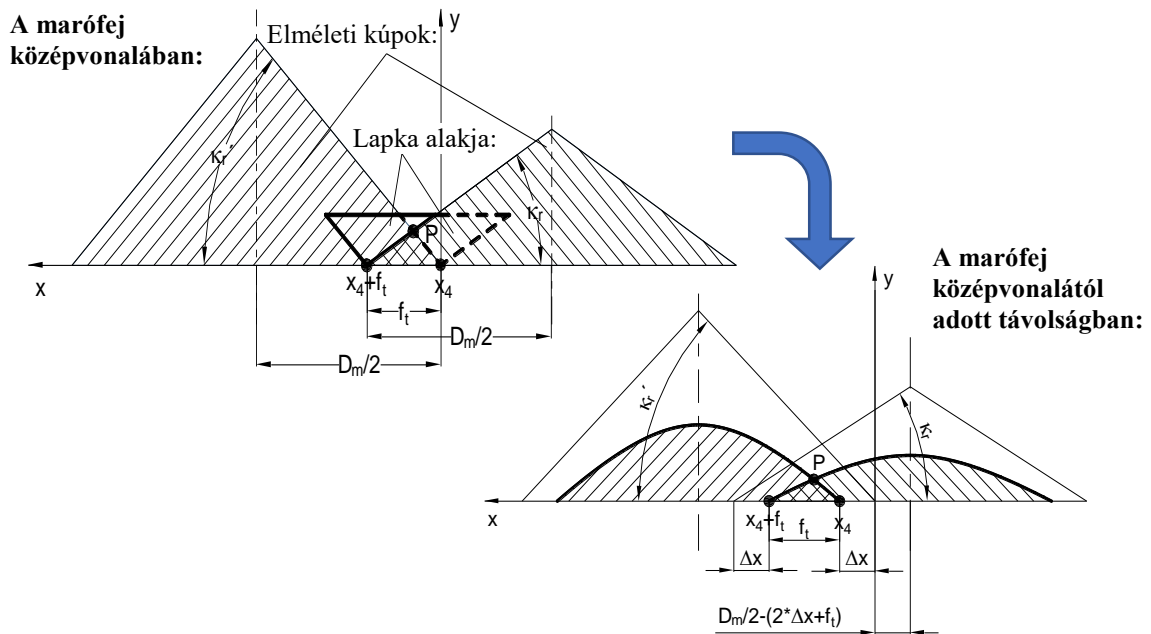
6. ábra. Az elméleti és a valós felületi érdesség esztergálásnál

2.2. Többélű szerszámmal végzett forgácsolás

Többélű szerszámmal végzett forgácsolásnál létrejövő elméleti érdesség meghatározását a homlokmarásra, mint egyik igen jellemző és gyakran alkalmazott eljárásra dolgoztuk ki. Homlokmarásnál legtöbbször a szerszám forog, a munkadarab pedig lineáris haladó mozgást végez (ettől eltérő konstrukció is elképzelhető, de mivel a relatív mozgások ugyanazok, ez az elméleti érdesség számítását nem befolyásolja). Amennyiben két dimenzióban, a szerszám középvonalában kívánjuk az elméleti érdességet meghatározni, és ütökéses megmunkálást feltételezünk (amikor egyszerre egy forgácsoló lapka van a szerszámtestben), akkor az esztergálásnál alkalmazott módszert tudjuk alkalmazni, tehát analitikusan ki tudjuk számítani az elméleti érdességi profilt, az alapján pedig a kívánt érdességi paramétereket. A szerszám középvonalától adott távolságban lévő profilok vizsgálata esetén azonban már nehézkessé válik az analitikus számítások elvégzése az eljárás kinematikai sajátosságai miatt: a szerszám-alapsíkban a szerszám középvonalától eltérő profinnál a szerszám lenyomata torzul, ahogy azt a 7. ábra szemlélteti. A 8. ábra hivatott erre magyarázatot adni: az egyenes élszakaszok a marófej forgása által egy elméleti kúpfelületet írnak le a térben, amelyeknek a marófej középvonalától adott távolságban elhelyezkedő metszősíkokban vett síkmetszetei hiperbolák. Ennél a közelítésnél az előtolás értékét elhanyagolhatónak tekintjük a forgácsoló sebességhez képest, amely egyszerűsítés általános gyakorlatnak tekinthető a hasonló munkáknál (Kyun Baek et al., 1997; Muñoz-Escalona et al., 2015; Felhő et al., 2015). Az ábra alapján látható tehát, hogy az egyenesek hiperbolákká alakultak át. A hiperbola általános paraméteres egyenletét a (3) mutatja.



7. ábra. Felületi profil torzulása a marófejtől d távolságban hegyes szerszám esetén



8. ábra. Az egyenes élszakaszok lenyomatainak átalakulása hiperbolákká a marófej középvonaltól adott távolságban

$$\frac{(y - k_h)^2}{a_h^2} - \frac{(x - h_h)^2}{b_h^2} = 1 \quad (3)$$

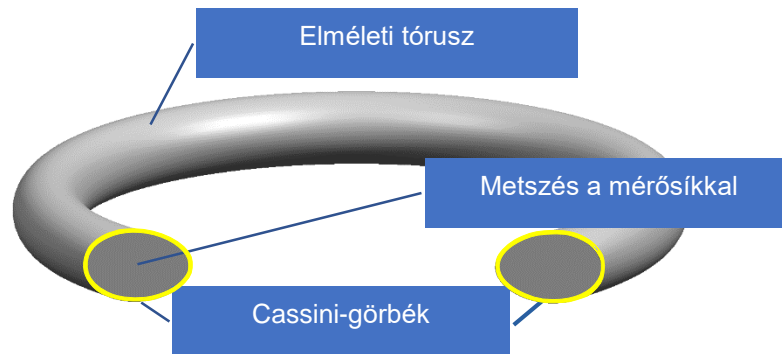
ahol:

- h_h, k_h : a hiperbola középpontjának x és y koordinátái, $h_h = -D_m/2$, $k_h = y_i(h_h)$ (ezeket az él eredeti egyenletéből ki lehet számolni);
- a_h : a fél- nagytengely (a két ág közötti távolság fele);
- b_h : fél- kistengely.

A (Felhő, 2014)-ban található behelyettesítések és egyszerűsítések után a következő összefüggést kapjuk a hiperbola egyenletére a marótengelytől adott Δy távolságra fekvő metszősíkban:

$$y = \pm \sqrt{\Delta y^2 (tg \kappa_{r1})^4 + \frac{\Delta y}{2} (tg \kappa_{r1})^3 (x - h_h)} + k_h \quad (4)$$

Ugyanakkor a forgácsoló szerszám dolgozó élének íves élszakaszai a marófej forgása által egy tórusz felületet síroznak, amelynek a marófej középvonalától adott távolságú metszősíkban vett síkmetszetei ún. Cassini-görbék (Karataş, 2013), amelyeknek a paraméteres formájú leírását az (5) egyenlet mutatja. Látható, hogy negyedrendű görbékről van szó, így ezek alkalmazásával az analitikus megoldás nehézkes, így a számítások elvégzésénél célszerűnek tűnik a numerikus módszerek alkalmazása.



9. ábra. A szerszám íves élszakasza által leírt elméleti tóruszfelület és annak a középvonalától adott távolságban lévő síkmetszetei az ún. Cassini-görbék

$$((x - h_s)^2 + (y - k_s)^2 - r^2 + D_m^2 + \Delta y^2)^2 = 4 \cdot D_m^2 ((x - h_s)^2 + \Delta y^2) \quad (5)$$

ahol:

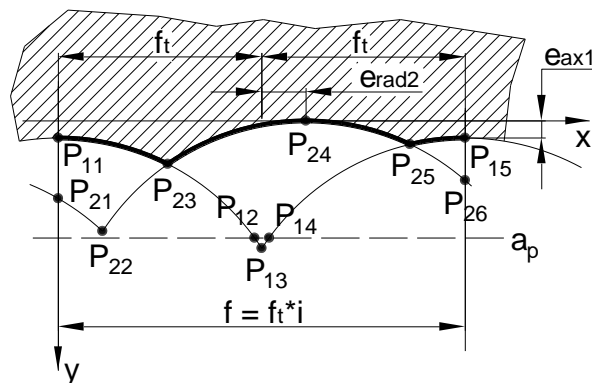
- r : csúcsrádiusz;
- D_m : marófej dolgozó átmérője;
- h_s, k_s : a tórusz középpontjának x és y koordinátái, $h_s = -D_m/2$, $k_s = r$;
- Δy : a marófej forgásközéppontjától való távolság.

Ezt az egyenletet y-ra rendezve megkapjuk a csúcsrádiusz (íves élszakaszok) egyenletét a marófej forgásközéppontjától adott Δy távolságú metszősíkban:

$$y = \pm \sqrt{\pm 2 \cdot D_m \sqrt{\Delta y^2 + (x - h_s)^2} - \Delta y^2 - D_m^2 - (x - h_s)^2 + r^2} + k_s \quad (6)$$

2.2.1.A forgácsoló lapkák axiális és radiális ütéseinek a figyelembevétele

Többélű szerszámmal végzett forgácsolásnál mindig van valamilyen mértékű eltérés az egyes lapkák között azok ideális (elméleti) pozícióihoz képest, ezeket nevezzük ütésnek. Ezen értékek a forgácsolási kísérletek során a szerszám összeszerelését követően szerszám bemérő készülékkel meghatározhatóak. Mivel a lapkákat síkban modellezzük, így két irányú eltérésről beszélhetünk: axiális ütések (tengelyirányban, az y-tengely mentén), illetve radiális ütések (sugárirányban, az x-tengely mentén). Az ütések elméleti számításnál történő figyelembe vételét a 10. ábra mutatja.

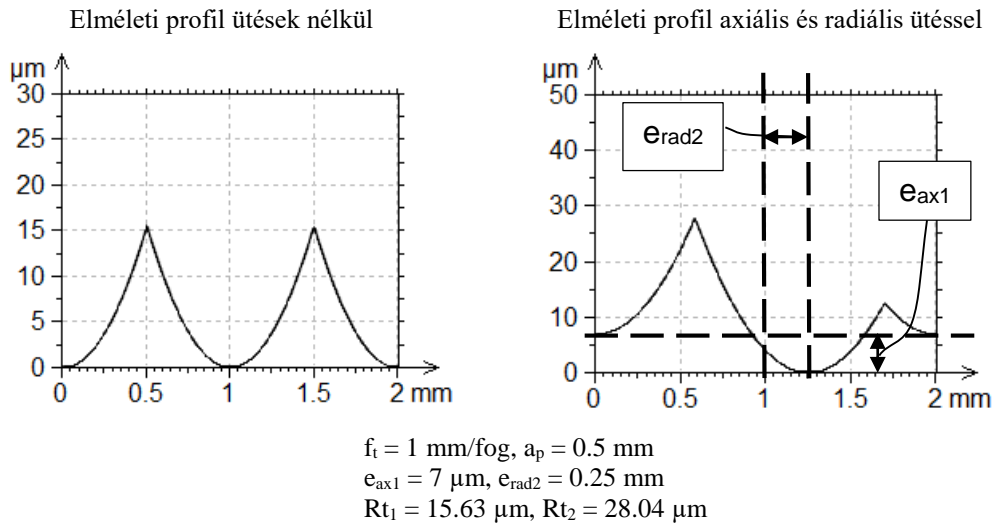


10. ábra. Radiális és axiális ütések figyelembe vétele az elméleti számításoknál

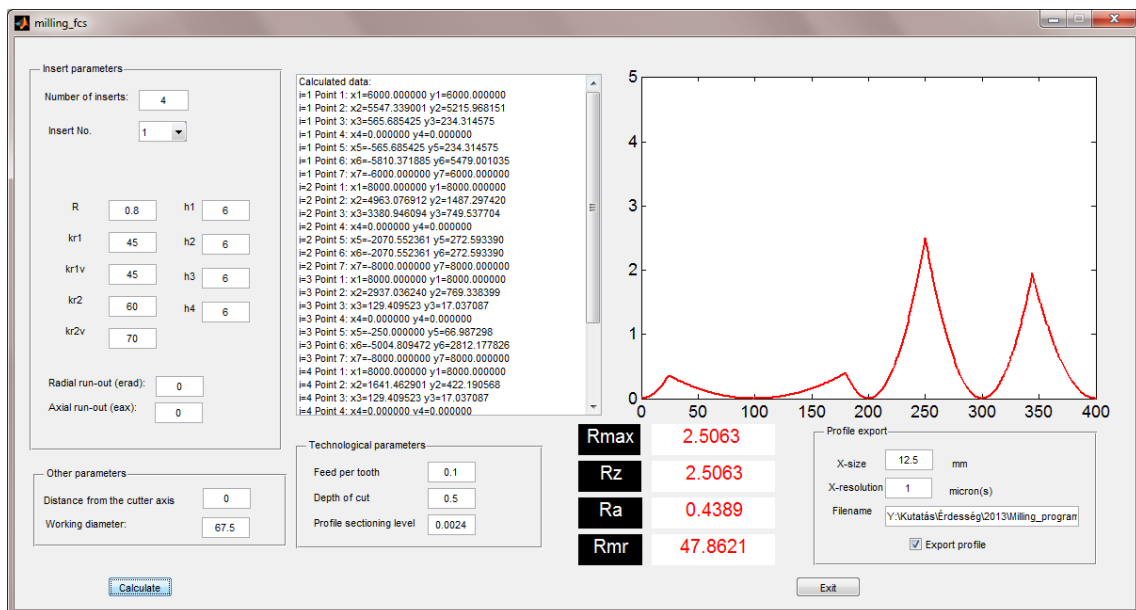
Az axiális ütés a lapka lenyomatát függőleges irányban tolja el, míg a radiális ütés pedig vízszintesen. Tehát a korábban meghatározott koordináta pontokat módosítanunk kell az ütések értékeivel, és így kell elvégezni a metszéspontok számítását. A részletes leírás a (Felhő, 2014)-ban található, itt most egy példát mutatunk be egy ütés nélküli és egy ütésekkel rendelkező elméleti profilra a 11. ábra segítségével. Az ábrán feltüntetésre kerültek az ütések értékei ($e_{ax1} = 7 \mu\text{m}$, $e_{rad2} = 0.25 \text{ mm}$), látható továbbá, hogy az ütések miatt a teljes profilmélység (R_t) $\sim 16 \mu\text{m}$ -ról mintegy $28 \mu\text{m}$ -re nőtt. Ezek alapján láthatjuk tehát, hogy az ütések figyelembe vétele igen fontos az elméleti érdesség meghatározásánál többélű szerszámmal végzett forgácsolás esetén.

A lapkák eltéréseinek a figyelembevétele lehetőséget biztosít a marók eltérő fogosztásának, valamint akár egymástól eltérő geometriával rendelkező lapkák egyidejű modellezésére is.

A fenti matematikai leírások alkalmazásával kidolgozásra került egy olyan számítógépes szoftver Matlab rendszerben, amely alkalmas az elméleti érdesség meghatározására homlokmarásnál. Az elkészített program képernyőjéről mutat egy pillanatfelvételt a 12. ábra.



11. ábra. Ütés nélküli és mind radiális (e_{rad}) mind axiális (e_{ax}) ütéssel rendelkező lapkával számított elméleti profil



12. ábra. A homlokmarásnál létrejövő elméleti érdesség számítására készített szoftver képernyőképe

Az ábrán látható, hogy a bemenő adatokat három blokkban kell megadni:

- Forgácsoló lapkák adatai („Insert parameters”): A felhasználónak meg kell adnia a lapkák számát a marófejben, ezt követően pedig minden egyes lapkára vonatkozóan a geometriai jellemzőket az esztergálásnál már korábban ismertettek szerint. Ezen túlmenően, amennyiben egynél több

lapka került megadásra az előzőekben, akkor az egyes lapkák axiális és radiális ütéseit is be kell vinnünk.

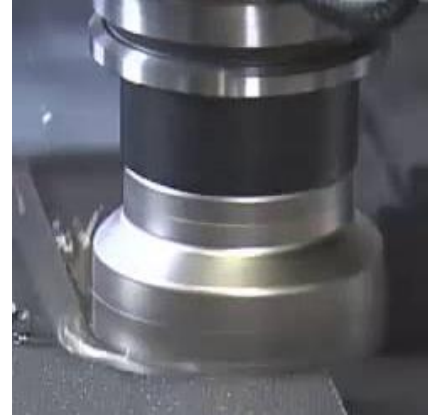
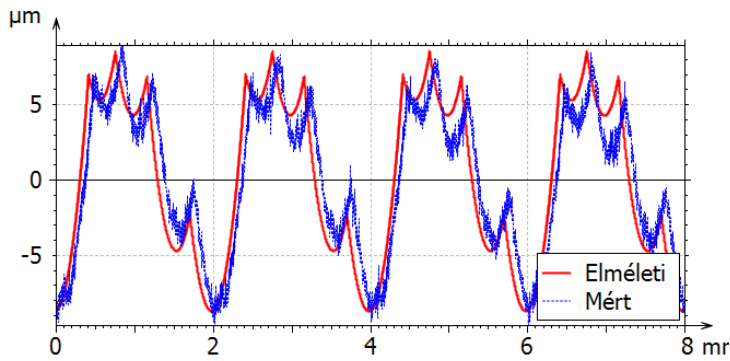
- A következő blokkban a technológiai paraméterek szerepelnek („Technological parameters”): itt a fogankénti előtolást, a fogásmélységet valamint a profilmetszés szintjét kell megadnunk (ez az RMR anyaghányad érdességi paraméter számításához szükséges a korábban ismertetettek szerint).
- A harmadik csoport pedig az egyéb paraméterek („Other parameters”): itt egyrészt a mérési síknak a marófej középvonalától mért távolságát, valamint a marófej dolgozó átmérőjét kell megadni.

A bemenő adatok megadása után a „Calculate” gombra kattintva a szoftver elvégzi a számításokat, az egyes metszéspontok értékeit a „Calculated data” részénél írja ki, valamint megjeleníti az R_{max} (=Rt), Rz, Ra, RMR érdességi jellemzők értékeit. Ezen túlmenően vizuálisan is megjeleníti az érdességi profilt egy szerszámfordulatra eső hosszban. További kiértékelési lehetőségként a generált profilból adott „mérési” hosszban, adott felbontással adatfájl is képes exportálni szöveges formátumban: a megadott lépéseknek megfelelően kiszámítja és elmenti az x és a hozzá tartozó y koordinátákat egy adatfájlba, amely a későbbiekben felhasználható tetszőleges felületi érdesség kiértékelő szoftverben történő feldolgozásra (pl. AltMap, Gwyddion, stb.).

A homlokmarással megmunkált felületek elméleti és valós érdességének az összehasonlítását a 13. ábra által vázolt kísérletek alapján mutatjuk be, amelynek a részletes leírása a (Felhő et al., 2018) irodalomban található. Ennek során C45 anyagminőségű acél próbadarabokat forgácsoltunk a Gyártástudományi Intézetben található Perfect-Jet MCV-M8-as típusú függőleges CNC vezérlésű marógépen. Az alkalmazott szerszám egy Coromill 200-as, 68 mm dolgozó átmérővel rendelkező marófej volt, amelybe 4 db 12 mm-es átmérőjű körlapkát helyeztünk. Ezután megmértük az egyes lapkák ütéseit egy Zoller Hyperion típusú szerszám bemérő készüléken, ezáltal ezen eltéréseket is figyelembe tudtuk venni az elméleti érdességi értékek számításánál. A forgácsolás elvégzése után a korábban már az esztergálásnál ismertetett módon és eszközökkel elvégeztük az eredmények kiértékelését, amelynek a vonatkozó eredményeit az ábra mutatja.

A profildiógram alapján látható, hogy az elméleti profil elég jól leköveti a mért adatokat, a két görbe majdnem fedésben van. Ennek oka elsősorban az alkalmazott viszonylag nagy fogankénti előtolás ($f_z = 0,3$ mm), kisebb előtolás értékeknél a mérethatasok jobban érvényesülhetnek, és ettől nagyobb eltéréseket tapasztaltunk, míg az előtolást tovább növelve (a hivatkozott cikkben egészen 0,9 mm-es fogankénti előtolásig megtalálhatóak az eredmények) a közelítés pontossága kismértékben még javult is.

C45 acél homlokmarása körlapkás homlokmaró szerszámmal, érdesség modellezés a lapkák ütéseinek figyelembevételével



Technológiai adatok: $f_z = 0,3$ mm/fog
 $n = 950$ 1/perc
 $a_p = 0,9$ mm
 Sandvik Coromill 200 marófej $\varnothing 68$ mm
 4 db RCKT1204M0-PM 4230 lapka

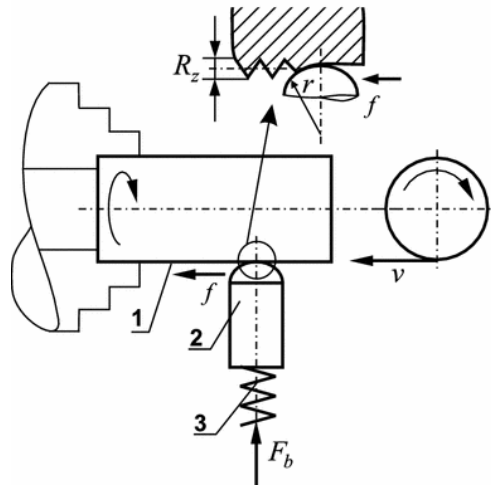
Érdességi eredmények:

	Elméleti	Mért
Ra	4,04	3,66
Rz	12,8	14,0
Rt	12,8	14,2

13. ábra. A homlokmarással megmunkált felületek elméleti és valós érdességének összehasonlítása

3. Képlékenyalakító megmunkálás (gyémántvasalás)

A gyémántvasalás, mint befejező megmunkálás már régóta alkalmazott eljárás a gépipari alkatrészek gyártásánál, mivel alkalmazása számos előnyös tulajdonságot nyújt. Ezek közül a legfontosabbak a felületi érdesség javulása (Ferencsik et al., 2022), valamint a képlékenyalakító technológiából adódó, a felület élettartamára kedvezően ható nyomó feszültségi állapot, illetve felületi felkeményedés kialakulása (Varga et al., 2018). A gyémántvasalás során az előzőleg valamilyen forgácsoló eljárással (pl. esztergálás, marás, köszörülés) megmunkált felületi topográfia elsimítása történik meg. A gyémántvasaló szerszám egy néhány milliméter sugarú gyémánt gömbszelet, amelyet a befoglaló fém szerszámtestbe ágyaztak be (Maximov et al., 2019). Az eljárást leggyakrabban külső hengeres felületek befejező megmunkálására alkalmazzák, de ezen kívül síkfelületek de akár furatok vasalása is megoldható (Varga, 2016). A hagyományos eljárásváltozatnál ez a gömbszelet csúszó súrlódással hosszirányban végighalad a megmunkált felületen a munkadarab forgása közben, ezáltal a megelőző művelet után visszamaradt érdességi csúcsokat elsimítja. Az eljárás kinematikai viszonyait a 14. ábra mutatja be. Látható, hogy az eljárás mozgásviszonyai az esztergálással megegyezők, azonban az alkalmazott szerszám geometriájából következően itt nincs forgácsleválasztás. Mivel így a fogásmélység nem értelmezhető, ezért a korábban esztergálásra ismertetett számítási eljárás az elméleti érdesség számítására gyémántvasalásnál közvetlenül nem alkalmazható.

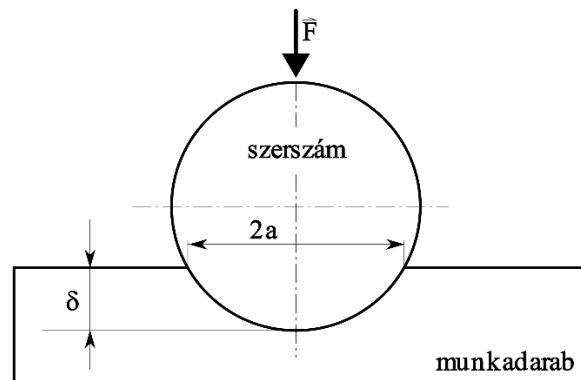


14. ábra. A gyémántvasalás elméleti vázlatja (Maximov et al., 2018)

(1: munkadarab, 2: szerszám, 3: rugó,

F_b : vasalóerő, R_z : érdesség, r : szerszámsugár, f : előtolás, v : vasalási sebesség)

Ezért szükséges az úgynevezett normál benyomódási mélység számítása, amely lehetővé teszi az esztergálásnál alkalmazott modellezési módszer felhasználását. Erre a leggyakrabban a Hertz-féle, rugalmas szilárd anyagok normál érintkezésére kidolgozott összefüggést javasolták a kutatók (Boughariou et al., 2010). A Hertz-elmélet különböző formájú testprimitívek érintkezésénél is alkalmazható (Popov, 2017), gyémántvasalás esetén egy gömb alakú testet (vasalószerszám) egy adott erővel nyomunk bele egy hengeres testbe (munkadarab). A 15. ábra mutatja a szerszám benyomódása során létrejövő elméleti „kráter” főbb geometriai méreteit: az a féltengelyt (az ábrán a $2a$ teljes tengelyirányú hossz van bejelölve) és a δ normál benyomódási mélységet.



15. ábra. A Hertz-féle összefüggésben feltételezett kapcsolódás (Bouزيد et al., 2004)

A Hertz elmélet azt feltételezi, hogy az érintkezési zóna ellipszis alakú. Ennek alapján az ábrán jelölt lenyomatjellemzők értékeit a következő, egyszerűsített egyenletek segítségével lehet kiszámolni (Bouزيد et al., 2004):

$$a = m \left(\frac{3\pi(K_1 + K_2)F}{2 \left(\frac{1}{R_1} + 2 \frac{1}{R_2} \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{3 \cdot 10^{-3} \pi}{4a} r (K_1 + K_2) F \quad (8)$$

ahol:

- F a nyomóerő értéke;
- K_1 és K_2 anyagparaméterek, amelyeknek a számítása a következő:

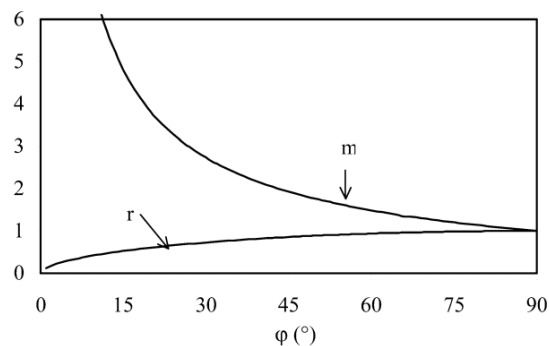
$$K_1 = \frac{1 - \nu_1}{\pi E_1} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{1 - \nu_2}{\pi E_2} \quad (10)$$

- ν_1 és ν_2 a munkadarab, illetve a szerszám Poisson-tényezői;
- E_1 és E_2 a munkadarab és a szerszám rugalmassági modulusai (Young modulus);
- az r és a m pedig a φ ún. segédszögtől függő tényezők, amelyeknek az értékeit a 16. ábra alapján tudjuk meghatározni. A φ segédszög a Hertz-féle érintkezésnél a szerszám és a munkadarab sugarától, valamint az egymással érintkező testek koordináta rendszereinek egymással bezárt szögétől függ (Deeg, 1992). Mivel azonban a hagyományos gyémántvasalásnál az érintkező testek normálisai által bezárt szög az érintkezés középpontjában 90° , így a φ számítására a következő egyszerűsített képlet alkalmazható:

$$\cos \varphi = \frac{R_2}{2R_1 + R_2} \quad (11)$$

- R_1 és R_2 a munkadarab illetve a szerszám sugara.



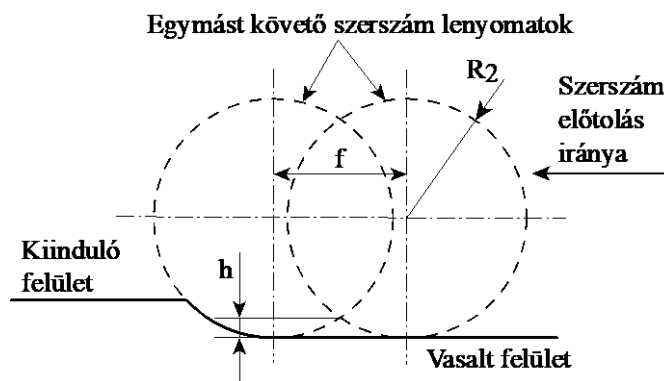
16. ábra. Az r és az m tényezők alakulása a φ segédszög függvényében (Bouزيد et al., 2004)

A vasalással nyert végső Rt teljes érdességmagassági tényező a szerszám f elötölásától, a δ normál benyomódási mélységtől valamint az Rti esztergálással vagy köszörüléssel nyert vasalás előtti felületi

érdességtől (kiinduló érdesség) függ. Ehhez szükséges az ún. barázdamélység kiszámítása, amely a vasalásnál elméletileg kialakuló érdességi csúcsok maximumát jelenti a 17. ábra szerint. A h maximális barázdamélység meghatározásához a két, egymást f távolsággal követő szerszámlenyomat metszéspontját kell kiszámolni, hasonlóan az esztergáláshoz. Itt két eltérő eset lehetséges:

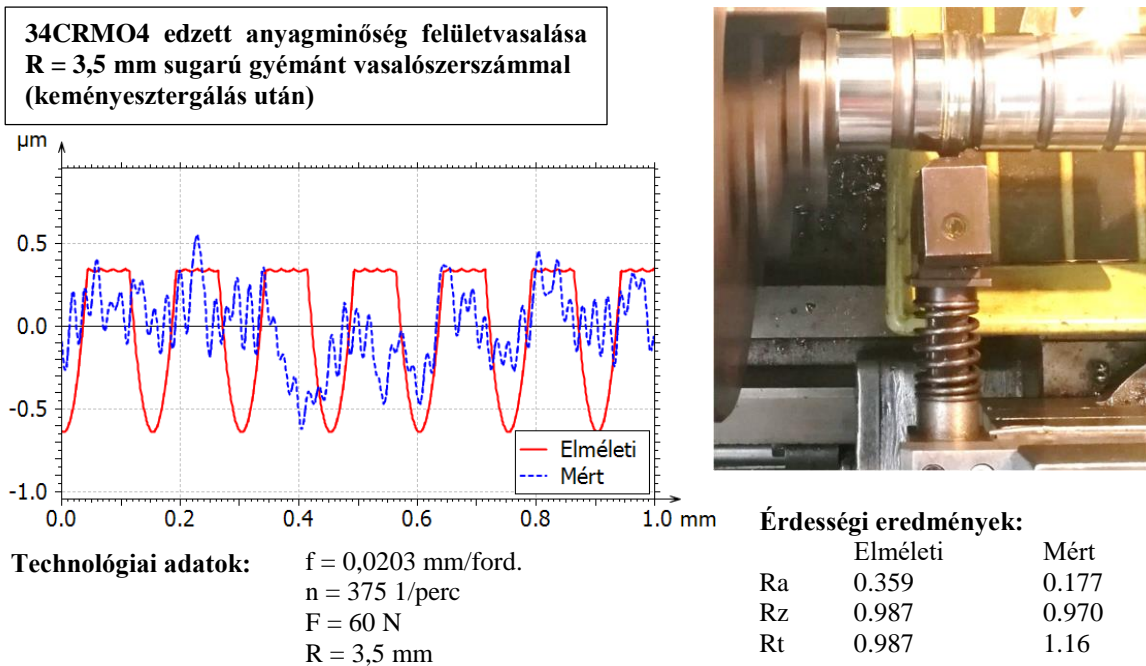
- Amennyiben kis előtolást alkalmazunk, a kiszámított barázdamélység értéke kisebb, mint a számított normál benyomódási mélység ($h \leq \delta$). Mivel az egyes lenyomatok közötti távolság kicsi, így a szerszám nagyobb eséllyel fogja az érdességi csúcsokat elsimítani, így kisebb lesz az eredő érdesség.
- Ha viszont $h > \delta$, tehát túl nagy a vasalási előtolás, akkor a golyó kisebb eséllyel tud minden csúcsot lesimítani, maradhatnak vissza kiemelkedések, így nagyobb érdességet kapunk. A határ-előtolásra – ahonnan már a $h > \delta$ tartományba kerülünk – a következő tapasztalati összefüggés alkalmazását javasolták a kutatók (Bougharriou et al., 2014):

$$f_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{\delta R_2}{125}} \quad (12)$$



17. ábra. A h maximális barázdamélység számítása vasalásnál (Bouzid et al., 2004)

A normál benyomódási mélység ismeretében tehát már meg tudjuk határozni az elméleti érdességet analitikus számításokkal. A módszer alkalmazására a 18. ábra mutat egy példát, amely a (Felhő et al., 2022) irodalom adatai alapján készült. A korábban keményesztergálással forgácsolt próbadarabok felületeit (amelynek az eredményeiből a 2.1 fejezetben mutattunk be egy részletet) vasaltuk meg egy 3,5 mm-es sugarú gyémánt vasalószerszámmal az EU 400-01-es egytetemes csúcseszterga gépen. Az alkalmazott paramétereket és az érdességi értékeket is feltüntettük az ábrán. Itt azért látható, hogy az elméleti és a mért érdességi profil jelentős eltérést mutat, viszont az érdességi értékek ezt a nagy eltérést nem annyira tükrözik. Az eltérés oka az lehet, hogy a valós folyamatnál az érdesség valójában sokkal inkább függ a kiinduló felület érdességétől, valamint az alkalmazott intenzív kenés (SAE 15W-40 olajat alkalmaztunk a folyamat során) ellenére az MKGS rendszer nem volt teljesen stabil.



18. ábra. Az elméleti és valós érdesség összehasonlítása gyémántvasalásnál

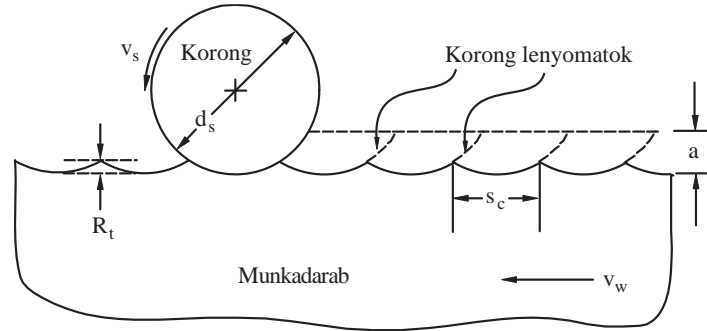
4. Határozatlan élgeometriájú szerszámmal történő forgácsolás (köszörülés)

A korábban bemutatott felosztás szerint (1. ábra) az utolsó csoportot a határozatlan élgeometriájú szerszámmal végzett megmunkálások alkotják. Ebben az esetben az elméleti érdesség számítása több szempontból is neheztett: egyrészt nem ismert a forgácsoló szemcsék geometriája, másrészt pedig azok eloszlása is véletlenszerű. Ezért az analitikus számításoknál bizonyos egyszerűsítéseket, feltételezéseket kell alkalmaznunk. Talán a legegyszerűbb megközelítése a problémának a Malkin és Guo (Malkin et al., 2008) által javasolt elméleti érdességi modell (19. ábra):

$$R_t = \frac{s_c^2}{4d_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{v_w L}{v_s d_s^{\frac{1}{2}}} \right)^2 \quad (13)$$

ahol:

- s_c : az egymást követő korong-lenyomatok távolsága;
- L : a szemcsék átlagos távolsága;
- v_w : a munkadarab sebessége;
- v_s : szerszám sebessége;
- d_s : szerszámtérő.



19. ábra. A Malkin és Guo által javasolt alapmodell (Malkin et al., 2008)

Látható, hogy ebben a modellben a síkköszörülésből, mint a geometriailag legegyszerűbben kezelhető eljárásváltozatból indultak ki, és a következő egyszerűsítéseket alkalmazták:

- a felületen a korong által visszamaradó körív alakú lenyomatok jelennek meg;
- a szemcsék alakjának nincs hatása a felületi érdességi profilra;
- az egymást követő lenyomatok között nincs eltérés sem a szemcsék csúcsainak radiális pozíciói, sem pedig azok egymás közötti távolsága tekintetében.

Típusos köszörülési körülmények esetén a fenti összefüggés alapján meghatározott értékek irreálisan alacsony érdességet adnak, az eltérés a valós mérési eredményekhez képest akár 1000-szeres is lehet (Son et al., 2020). Ugyanebben a műben a szerzők egy továbbfejlesztett modellt is javasoltak, ahol figyelembe vették a szemcsék egymáshoz képest véletlenszerű elhelyezkedését is, statisztikai módszerek alkalmazásával:

$$R_t = a_1 \left(\frac{v_w}{v_s (\rho d_s)^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2}} + b_1 \quad (14)$$

ahol:

- a_1 és b_1 : az aktív szemcsék radiális eloszlása alapján meghatározott paraméterek (statisztikai adatok);
- ρ : a szemcsék csúcsrádusza, amely értékre a szemcsék átlagos méretének a felét feltételezzük.

Hecker és Liang (Hecker et al., 2003) a felületi érdességet az elméleti forgácsvastagság alapján becsülte. Az elméleti forgácsvastagság leírására pedig a Rayleigh valószínűségi függvényt javasolták, amely egy folytonos valószínűség eloszlást jelent, és a következő alakban írható fel:

$$f(h) = \begin{cases} (h / \sigma^2) e^{-h^2/2\sigma^2} & h \geq 0 \\ 0 & h < 0 \end{cases} \quad (15)$$

ahol:

- h : elméleti forgácsvastagság
- σ : a valószínűségi sűrűségfüggvény paramétere, amelyet az anyagjellemzők (keménység), a korong mikroszerkezete, dinamikus hatások és a köszörülés kinematikai viszonyai (fogásmélység, korong és munkadarab kerületi sebessége) alapján lehet meghatározni (Hecker et al., 2007).

A kiszámított elméleti forgácsvastagság alapján a felületi érdességet a

$$E(R_a) = 0,423E(h) \quad (16)$$

tapasztalati képlettel lehet kiszámolni, ahol:

- $E(R_a)$ a felületi érdességi paraméter várható értéke;
- $E(h)$: az elméleti forgácsvastagság várható értéke.

Látható, hogy az elméleti érdességet az elméleti forgácsvastagság alapján egy konstans segítségével közelítik meg.

Továbbá azt is feltételezték ebben a munkában, hogy az egyes köszörűszemcsék háromszög alakúak. Ugyanezen módszert többen is alkalmazták, például Khare és szerzőtársai is (Khare et al., 2015), de ők félkör alakú szemcsékkel számoltak, így a következő összefüggést kapták:

$$E(R_a) = 0,471E(h) \quad (17)$$

Hasonló elv mentén dolgoztak még (Agarwal et al., 2008) és (Saxena et al., 2016) is, ők is ugyanezen módszerrel vizsgálták az eljárást, más és más szemcse alakokat (síkban vizsgálva parabola illetve ív) feltételezve, és a fentiekhez hasonló egyenleteket kaptak, ahol elsősorban az elméleti forgácsvastagságból az adott érdességi paraméterhez alkalmazott közelítő konstansok változnak.

Tovább tudjuk finomítani az érdességi modelleket, ha a korong kopását és újraélezését is figyelembe vesszük az elméleti érdesség számításánál, erre Jiang és szerzőtársai mutattak be egy lehetséges megoldást (Jiang et al., 2013). Itt azt feltételezték, hogy a szemcsék szabályos gömb alakúak, és a kopás, illetve az egyszemcsés gyémánttal történő szabályozás adott mélységre koptatja le a szemcséket, és ezeket a metszésvonalakat kiszámítva korrigálták a szabályos alakzattal előzőleg számított elméleti profilt.

Ez az irodalmi feldolgozás nyilvánvalóan nem teljeskörű, ennél lényegesen több kutató foglalkozott ezzel a témával, különböző eljárásokat alkalmazva. Mint korábban említettem ezen a területen a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézete korábban már végzett vizsgálatokat ezen a területen, de a jelenlegi kutatócsoportunk még most kezdi ezirányú kutatásait. Várhatóan ez a téma is meg fog jelenni az Intézet jövőbeli projektjeiben, mint egyik lehetséges régi/új kutatási irány, ezért is éreztem azt, hogy érdemes néhány gondolat erejéig felvillantani az ebben rejlő lehetőségeket.

5. Összefoglalás

A cikkben a szerző megpróbált egy átfogó képet adni a különböző típusú megmunkáló eljárásoknál alkalmazott analitikus számítási lehetőségekről az elméleti érdesség meghatározására. Az így kapott elméleti értékek alapján becsléseket tehetünk a valós forgácsolási folyamatok során az adott feltételek mellett forgácsolt felületek várható érdességére. A bemutatott módszerek azonban csak egy-egy lehetséges megközelítései a problémának, és nem is mindig az analitikus eljárások alkalmazása a leginkább célravezető (Lu, 2008). Egyik nyilvánvaló hátránya lehet ezeknek a számításoknak, hogy számos olyan tényezőt hagynak figyelmen kívül, ami befolyásolhatja a valós érdességet: a forgácsoló erők és azzal kapcsolatosan az MKGS-rendszer rezgései, a forgácsoló szerszám saját élérdessége, az élrádiusz hatása, az anyagjellemzők hatása, stb. Ahogy az a „Bevezetés” fejezetben is említésre került, léteznek teljesen eltérő technikák is a felületi érdesség becslésére. A szerző is bemutatott korábban egy korszerű, CAD-modellezésen alapuló eljárást az elméleti érdesség meghatározására homlokmarásnál (Felhő, 2021). Ez a módszer az itt bemutatott analitikus számításokon alapul, azoknak mintegy továbbfejlesztésének tekinthető. Ez a CAD-alapú modellezés lehetővé teszi, hogy gyakorlatilag tetszőleges élgeometriájú szerszámmal – a CAD-modellezés korlátain belül – tetszőleges kinematikával rendelkező eljárásváltozatot

tudjunk vizsgálni, és akár háromdimenziós felületeket is tudjunk szimulálni a segítségével. Azonban az analitikus modellezésnek is megvan a maga létjogosultsága: ennek a segítségével tudjuk mélyebben megérteni az egyes eljárások működését, valamint a létrejövő felületek mikrogeometriájának a sajátosságainak a kialakulását, annak ok-okozati összefüggéseit.

Irodalom

- [1] Agarwal, S., & Venkateswara Rao, P. (2008). Surface roughness prediction model for ceramic grinding. In *ASME Proceedings Series: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Köt. 1, pp. 1237–1245). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-79180>
- [2] Benardos, P., & Vosniakos, G.-C. (2003). Prediction surface roughness in machining - review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 833–844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
- [3] Bougharriou, A., Bouzid, W., & Saï, K. (2010). Prediction of surface characteristics obtained by burnishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1), 205–215. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2601-y>
- [4] Bougharriou, A., Bouzid, W., & Saï, K. (2014). Analytical modeling of surface profile in turning and burnishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1), 547–558. <https://doi.org/10.1007/S00170-014-6168-X>
- [5] Bouzid, W., Tsoumarev, O., & Sai, K. (2004). An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(1), 120–125. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1761-4>
- [6] Deeg, E. W. (1992). New algorithms for calculating Hertzian stresses, deformations, and contact zone parameters. *AMP Journal of Technology*, 2, 14–24.
- [7] Felho, C., & Varga, G. (2022). Theoretical roughness modeling of hard turned surfaces considering tool wear. *Machines*, 10(3), 188. <https://doi.org/10.3390/machines10030188>
- [8] Felhő, C. (2014). Investigation of surface roughness in machining by single and multi-point tools (33. kiad.) Aachen: Shaker Verlag. Elérés forrás <http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-2922-2>
- [9] Felhő C. (2021). A felületi érdesség CAD alapú modellezése nagytermelékenyséű forgácsoló eljárásoknál. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11(2), 48–54. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.7>
- [10] Felhő, C., Karpuschewski, B., & Kundrák, J. (2015). Surface roughness modelling in face milling. *Procedia CIRP*, 31, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.075>
- [11] Felhő, C., & Kundrák, J. (2014). Investigation of the topography of machined surfaces. *Applied Mechanics and Materials*, 693, 412–417. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.693.412>
- [12] Felhő, C., & Kundrák, J. (2018). Effects of setting errors (insert run-outs) on surface roughness in face milling when using circular inserts. *Machines*, 6(2), 14. <https://doi.org/10.3390/machines6020014>
- [13] Felhő, C., & Varga, G. (2022). CAD and FEM modelling of theoretical roughness in diamond burnishing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 23(4), 375–384. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00622-5>

- [14] Ferencsik, V., & Varga, G. (2022). The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces. *Machines*, 10(7), 564. <https://doi.org/10.3390/machines10070564>
- [15] Hecker, R. L., & Liang, S. Y. (2003). Predictive modeling of surface roughness in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 755–761. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00055-5)
- [16] Hecker, R. L., Liang, S. Y., Wu, X. J., Xia, P., & Jin, D. G. W. (2007). Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5), 449–459. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0473-y>
- [17] Jiang, J. L., Ge, P. Q., Bi, W. B., Zhang, L., Wang, D. X., & Zhang, Y. (2013). 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 74, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2013.07.002>
- [18] Karataş, M. (2013). A multi foci closed curve: Cassini oval, its properties and applications. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 2(14), 231–248. <https://doi.org/10.31671/dogus.2018.108>
- [19] Khare, S. K., & Agarwal, S. (2015). Predictive modeling of surface roughness in grinding. *Procedia CIRP*, 31, 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.092>
- [20] Kundrák, J. (1996). *The scientific principles of increasing the effectiveness of inner surfaces cutting with CBN tools*. Harkovi Műszaki Egyetem, Harkov.
- [21] Kundrak, J., & Felho, C. (2018). Topography of the machined surface in high performance face milling. *Procedia CIRP*, 77, 340–343. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.030>
- [22] Kyun Baek, D., Jo Ko, T., & Sool Kim, H. (1997). A dynamic surface roughness model for face milling. *Precision Engineering*, 20(3), 171–178. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(97)00043-3)
- [23] Lu, C. (2008). Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1), 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.270>
- [24] Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. (2nd ed) New York: Industrial Press.
- [25] Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., Ganev, N., Amudjev, I. M., & Dunchev, V. P. (2018). Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(4), 194. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1135-3>
- [26] Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., & Ichkova, M. D. (2019). Slide burnishing—review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1), 785–801. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03881-1>
- [27] Muñoz-Escalona, P., & Maropoulos, P. G. (2015). A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.06.011>
- [28] Popov, V. L. (2017). *Contact mechanics and friction: physical principles and applications* (2. kiad.) New York, NY: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53081-8>
- [29] Saxena, K. K., Agarwal, S., & Das, R. (2016). Surface roughness prediction in grinding: a probabilistic approach. *MATEC Web of Conferences*, 82, 01019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168201019>
- [30] Son, N. H., & Uyen, V. T. N. (2020). Surface roughness model in grinding. *Technology Reports of Kansai University*, 62(03), 901–907.

- [31] Varga, G. (2016). Possibility to increase the life time of surfaces on parts by the use of diamond burnishing process. *Key Engineering Materials*, 686, 100–107.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.686.100>
- [32] Varga, G., & Ferencsik, V. (2018). Investigation of the influence of different burnishing parameters on shape correctness and residual stresses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448, 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012016>