

Az érdesség-előállító képesség vizsgálata esztergálásnál

Examination of surface roughness producing ability in case of turning

Sipos Sándor, Mészáros Béla, Ráczki Viktor, Mikó Balázs

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
sipos.sandor@bkgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás - A nagyon sokféle feladat elvégzésére alkalmazható forgácsoló szerszámoknál az igazi nehézséget a szóba jöhető választék nagy száma okozza, mert egy adott műveletnél össze kell hangolni a technológiai körülményeket a gazdasági rentabilitással és a minőségi követelményekkel. Az esztergáló szerszámok területén megjelenő innovációk – az új elveknek megfelelő konstrukciós megoldásaikkal – még tovább bonyolítják a helyzetet. A cikk célkitűzése a különböző kivitelű és rendeltetésű esztergaszerszámok érdesség-előállító képességének összehasonlítása, elemzése és sajátosságainak vizsgálata. Jelen anyag a forgácsleválasztás elméleti egyenleteit és a mérésrel meghatározott értékek közötti összefüggéseket hasonlítja össze, és modelleket ismertet a különböző körülményekkel esztergált felületek érdességi jellemzőinek leírására.

Kulcsszavak: érdességi paraméterek, szerszámválasztás, forgácsleválasztási módok, elméleti érdesség, simasági jellemzők összefüggései

Summary - For (universal) cutting tools, being usable to perform a wide variety of tasks, the real difficulty is the enormous number of possible choices, because the technological conditions for a given operation must be harmonised with economic profitability and quality requirements. Innovations, emerging in the field of turning tools, introduce design solutions, corresponding to the new principles, further complicate the situation. The aim of the present article is to compare and analyse the roughness producing ability of turning tools, having different designs and functions, and to examine their features. The present paper attempts to verify the relationships between the theoretical equations of chip removal and the values, determined by measurement, and presents models to describe the roughness characteristics of surfaces, turned under different conditions.

Keywords: roughness parameters, tool selection, chip separation methods, theoretical roughness, smoothness characteristics

BEVEZETÉS

A különböző célú esztergálási műveletek tervezése során az okoz igazán nehézséget, mely szerszám alkalmazása a legcélszerűbb a számos szóba jöhető változat közül. A technológiai előírásokat és az egyre szigorodó minőségi követelményeket össze kell hangolni a nagy termelékenységgel és a költséghatékonysággal. A kérdés így vetődik fel: a már meglévő készletekből történő választás (ragaszkodás a régi gyakorlathoz) vagy pedig az ezen a területen megjelenő számos innováció hozhat nagyobb hasznot.

A cikk a minőségi előírások teljesítéséhez ad segítséget azzal, hogy a különböző kialakítású szerszámok viselkedését jellemzi az érdesség-előállítási képességük alapján. *Fő célkitűzésünk* a különféle alakú lapkák hatékonyságának összehasonlítása volt. Arra kerestük a választ, mennyire lehet megközelíteni a régi és az új elméleti egyenletekre támaszkodva a többszöri mérésrel meghatározott adatokat. Másik célunk annak eldöntése volt, hogy az érdesség különböző paraméterei között felfedezhető-e kapcsolat, az érdességi profilnak vannak-e olyan jellemzői, amelyek egy univerzális paramétert jelentenek. A korszerű mérőeszközökkel elvégzett szisztematikus teszt sorozat eredményeit ezért nem csak az iparban megszokott adatokkal (Ra, Rz) jellemezzük, hanem azokra a paraméterekre is kitérünk, amelyek a különböző beállítással megmunkált felületeket a felhasználás során jellemezzhetik.

Jelen kutatás végső célja az ISO geometriájú lapkák leghatékonyabb alkalmazási körülményeinek és a leginkább megfelelő adatok meghatározása volt.

1. A FORGÁCSLEVÁLASZTÁS SAJÁTÓSÁGAI ESZTERGÁLÁSKOR

A szabályos élgeometriájú szerszámok forgácsleválasztása teljes mértékben összefügg az éppen megmunkált felület alakpontosságával és felületminőségével. A szerszám forgácsoló részének kialakítása (élszögek, csúcsgugár, élpreparáció) és a forgácsolási adatok közül elsősorban az előtolás és a fogásmélység az, amely döntő mértékben meghatározza a felület mikrogeometriáját.

Az esztergáláskor kialakuló elméleti érdesség meghatározása az 1930-as években elkezdődött, az előtolás és a csúcsgugár (RE, mm) közötti összefüggéseket Bauer (1937) publikálta. Tovább pontosította 1961-ban a képleteket Brammertz, aki már a minimálisan leválasztható forgácsvastagsággal (h_{min} , mm) is foglalkozott [1]. Ezek az összefüggések az előtolás és a csúcsgugár szerepét emelik ki. A forgácsleválasztásban azonban meghatározó szerepet játszanak az ún. nézeti szögek is, tehát a főélszög (KAPR), csúcshézag (EPSR) és a mellékélszög (ECEA). Esztergáláskor – a csúcsgugárral együtt – ezek határozzák meg a leválasztott forgács (metszet) alakját és a szerszám kinematikai nyomát jelentő érdességet, amely a beállított előtolás (f , mm) mértékével függ össze. A hatvanas évektől kezdődően több kutató is képleteket közölt az elméleti érdesség és a nézeti szögekkel kapcsolatban, elég csak Kardos, Szokolovszkij, Makarov, Brewer, Gribovszki

munkáit említeni [2, 3, 4, 5, 6]. A számítógépek tömeges megjelenésével egyidejűleg a forgácsleválasztásról egyre pontosabb modellek jelentek meg [7], az egyre korszerűbb, tapintó elven működő érdességmérők pedig lehetővé tették a kísérletekből származó adatok összevetését az elméleti érdességi képletek eredményeivel. Az ipar igényei szerinti érdesség-vizsgálatok területén akkor emelkedett a kísérletező kedv és a publikációk száma, amikor a statisztikai kísérlettervezés (DoE) különféle módszerei elterjedtek, például a teljes faktoranalízis, válaszfelületek módszere stb., a forgácsolási tényezők (faktorok) és az érdesség egyes jellemzőinek (paraméter) modellezésére [8, 9].

Az egyre precízebb gyártmányok és előállítási eljárásaik természetesen egyre pontosabb előírásokat (szabványokat) és vizsgálati módszereket követelnek meg. A megmunkált felületek jellemzésére az érdességi jellemzők bővülő köre szolgál, amelyek pontosabban képesek leírni az előállított felületi textúrát. A tapintóval végrehajtott 2D-s elemzéseket fokozatosan felváltják a 3D-s vizsgálatok, amelyeknél már nincs is szükség a felület megérintésére [10, 11, 12].

Jelen anyag a forgácsleválasztás és a felületi érdesség alakulásának szempontjából foglalja össze a különféle kialakítású, azaz a kitzűzött célnak megfelelően választott lapkákkal és a befogásukra szolgáló tartókkal elvégzett szisztematikus tesztsorozat eredményeit. A szerzők alapvető célkitűzése az elméleti egyenletek és az érdességméréssel meghatározott értékek közötti kapcsolat megkeresése volt. A kapott adatok alapján különféle modelleket dolgoztunk ki, emellett a paraméterek olyan összefüggésrendszerét tártuk fel, amely alkalmas az érdességi jellemzők közötti kapcsolat számítógépes programjának kifejlesztésére is.

1.1 A forgácsleválasztás módjai esztergáláskor

Esztergáláskor – előre beállított fogásmélységgel (a , mm) és előtolással (f , mm) dolgozva – a munkadarabbal elvileg a szerszám főéle, csúcscsugara és mellékéle érintkezik. A forgácsolás körülményeit a technológia adatok és a szerszámkialakítás határozzák meg, ahol a forgácsot közvetlenül leválasztó szerszámrészek az aktív élhossz (l_{akt}) alkotják. A leválasztásban résztvevő élszakaszok alapján meg lehet különböztetni

1. *rádiuszon* történő finomesztergálást, amikor a fogásmélység (a) kisebb, mint az RE csúcscsugár ($a < RE$),
2. ritka esetben *fordított forgácsolást*, amikor a rádiuszon történő forgácsoláskor az előtolás (f) nagyobb, mint a fogásvétel ($a < RE$ ÉS $a < f$). Ilyen fordul elő az újabban elterjedt ún. high feed turning esetében,
3. nagyon gyakori eset az *(él)csúcson* végzett esztergálás, amikor csak a főél és a csúcscsugár vesz részt a forgácsképzésben, azaz a $a > RE$, de a mellékél passzív szereplő,
4. hasonlóképpen igen gyakori az az eset, hogy *mindhárom élszakasz* (azaz a mellékél is) részt vesz a forgácsolásban.

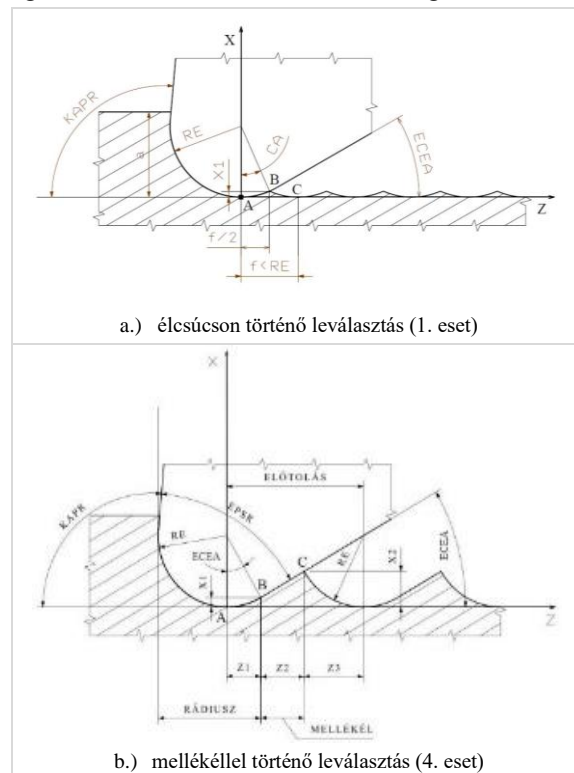
Az aktív élhossz tanulmányozása elsősorban azért fontos, mert a méret létrehozásában döntő szerepe van: a munkadarabbal érintkező csúcscsugár egyetlen pontja az ún. forgácsolópont, és ennek kis környezetében alakul ki a

megmunkált felület mikrogeometriája, azaz a hullámossága és az érdessége.

A részekre tagolható aktív élhossz között vannak olyan szakaszok, amelyek kizárólag a szerszám kialakításától, azaz élszögeitől és csúcscsugarától függenek. Ezen részek az esztergált felületre rámásolódnak, mégpedig olyan diszkrét távolságokban, amilyen mértékű az alkalmazott előtolás. Amennyiben tehát az érdesség és az előtolás összefüggésének vizsgálata a célkitűzés, az aktív élhossz meghatározása nélkülözhetetlen.

Az 1. ábra a két legfontosabb leválasztási módszer sajátosságait mutatja be két, jellemző változat esetén. Az egyik kialakítás tartózkodja xDJxx (főélszög: 93°), az illeszkedő lapka jele „D” (csúcscsög: 55°), míg a másik szerszám tartója xCLxx (főélszög: 95°), a lapka pedig „C” (csúcscsög: 80°) jelölésű. Megjegyezzük, hogy csak azokat a kódokat adtuk meg, amelyek a vizsgálatunk szempontjából fontosak, a többit „x” helyettesíti.

Az *élcscsúcson történő forgácsolás* elterjedten alkalmazott bonyolult geometriák, illetve henger-, kúp- és/vagy tóruszfelületek simító (ún. kontúrkövető) esztergálásakor (1/a. ábra). A befogott lapka csúcscsöge (EPSR) általában nem nagyobb 60° -nál (az ISO 1832 szerinti besorolás szerint „T”, „D”, esetleg „V” alakú), a forgácsleválasztásban a főél és a csúcscsugár vesz részt.



1. ábra: A működő élszakaszok esztergáláskor

A forgácsot közvetlenül leválasztó szerszámrészek az aktív élhossz alkotják, amelynek képlete – az ISO13399 szabvány jelöléseit alkalmazva – a következő:

$$l_{akt} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot KAPR + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot \sin^{-1} \frac{f}{2 \cdot RE} \quad [mm] \quad (1).$$

Az (1) egyenletből látható: egy beállított fogásmélységgel (a , mm) dolgozó lapka élhossza csúcson történő esztergáláskor két részből tevődik össze. A

szerszám kialakításától (KAPR, RE) függő tagok konstans értéket adnak, meghatározása:

$$l_{const} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot KAPR \quad [mm] \quad (1a),$$

míg az AB élszakasz metszi (másképpen behatárolja) az egy fordulattal előző rádiusz BC szakaszát. Az előtolástól függő rész (amelyet az 1/a. ábrán a CA szög reprezentál) a következő:

$$l_f = \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot \sin^{-1} \frac{f}{2 \cdot RE} \quad [mm] \quad (1b).$$

A három élszakasszal történő esztergáláskor már a mellékél is aktívan részt vesz a forgácsképzésben, ezért a darabbal érintkező élhossz képlete az alábbira módosul:

$$l_{akt} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (KAPR + ECEA) + \frac{RE}{\sin ECEA} \cdot \left\{ \cos ECEA - \sin \left[ECEA - \sin^{-1} \left(\frac{f \cdot \sin ECEA}{RE} - 1 \right) \right] \right\} \quad [mm] \quad (2)$$

A (2) összefüggés elemzéséből az derül ki, hogy a szerszám kialakításától (KAPR, ECEA, RE) függő tagok konstans értéket adnak:

$$l_{const} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (KAPR + ECEA) \quad [mm] \quad (2a)$$

míg az éppen dolgozó élszakaszok előtolástól függő része a következő:

$$l_f = \frac{RE}{\sin ECEA} \cdot \left\{ \cos ECEA - \sin \left[ECEA - \sin^{-1} \left(\frac{f \cdot \sin ECEA}{RE} - 1 \right) \right] \right\} \quad [mm] \quad (2b)$$

A 2. ábra a forgácskeresztmetszetet meghatározó (fogásvételi és előtolási) adatok függvényében szemlélteti a működő élhossz alakulását a vizsgált kétféle szerszámkialakításnál. Megjegyezzük, hogy vizsgált változatoknál a KAPR főélszög gyakorlatilag megegyező (93°, illetve 95°).

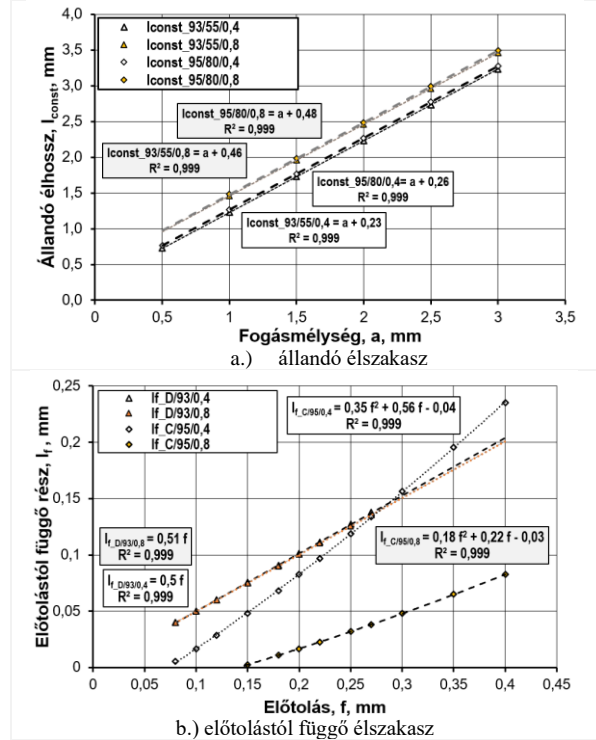
A 2/a. ábra a fogásmélység függvényében tünteti fel az állandó élszakaszokat. A közölt diagramból megállapítható, hogy

- az élhossz nagyságát a döntő mértékben a fogásmélység határozza meg, míg a csúcsgűr szerepe elhanyagolható,
- a C alakú lapkánál a nagyobb csúcsgűr esetén már kimutatható a mellékél szögének (ECEA=5°) élhosszra növelő hatása,
- a diagram nem tartalmazza a rádiuson történő forgácsolás esetét, amelyet az a=0,5 mm és RE=0,8 mm, azaz RE > a körülmények jellemeznek.

A beállított előtolás függvényében négy esetet tüntet fel a 2/b. ábra. A diagramokat elemezve megállapítható, hogy

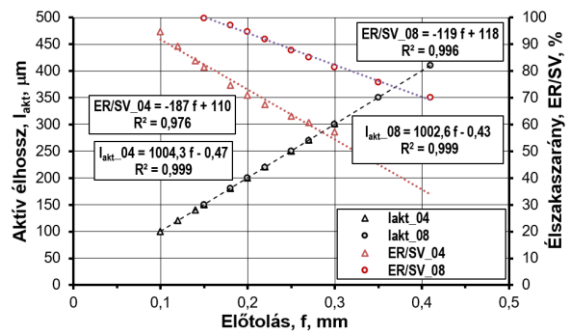
- mindkét kialakításnál az élhossz előtolástól függő része egy nagyságrenddel *kisebb*, mint a kialakítástól függő l_{const} élszakasz,
- az előtolástól függő élszakasz méretét csak a mellékélszög (ECEA) és az alkalmazott csúcsgűr (RE) értéke befolyásolja. Az előbbi függ a tartó KAPR élszögétől, a lapka alakjától és annak csúcshölygétől (EPSR),

- nagy mellékélszög esetén (D alakú lapka, ECEA=32°) a beállított előtolás felének megfelelő élszakasz vesz részt a forgácsleválasztásban, míg kis mellékélszög esetén (C alakú lapka, ECEA=5°) ez a hányad kisebb,
- a diagram nem tartalmazza az RE=0,8 mm csúcsgűr esetén a kritikus előtolásnál kisebb értékeket ($f_{krit} \geq 0,14$ mm), ilyen körülmények között ugyanis nem érvényes a „három élszakaszos” leválasztás (azaz csúcson történő esztergálásnál fordul elő).



2. ábra: Különböző szerszámkialakítások élszakaszai

Az üzemi gyakorlatban alkalmazott esztergálási adatok alapján az állapítható meg, hogy az aktív élhossz döntő részét a konstans szakasz adja, míg az előtolástól függő rész *mindössze 5...8%-ot tesz ki* az állandóan dolgozó részhez viszonyítva.



3. ábra: Forgácsleválasztás aktív mellékél esetén

A 2. ábra alkalmas különböző fogásmélység és előtolás adatok beállítása esetén a vizsgált két szerszámváltozat élszakaszainak számítására, terjedelmi korlátok miatt azonban a képletek közlésétől eltekintünk.

A mellékéllal történő forgácsleválasztás sajátosságait elemezve még egy fontos részlet lehet megemlíteni. A 3. ábra a „C” alakjelű lapka EPSR=80°/ECEA=5° csúcscsával történő esztergálás élhosszviszonyait mutatja be. A diagramból, de főleg a regressziós egyenletekből az derül

ki, hogy az aktív élhosszak gyakorlatilag nem mutatnak különbséget a vizsgált kétféle csúcsgugár alkalmazása esetén sem.

Az is megállapítható, hogy a lapka rádiusza (RE) és mellékéle (SV) másként veszi ki a részét a forgácsképzésből: az előtolás növelésekor RE=0,4 mm esetén 95%-ról 60%-ra, RE=0,8 mm-nél pedig 100%-ról 70%-ra csökken a rádiusz által leválasztott forgács mennyisége. Ez természetesen azt is jelenti, hogy kis csúcsgugár alkalmazásakor a mellékél szerepe jelentős, de a nagyobb rádiusznál is érződik a hatása.

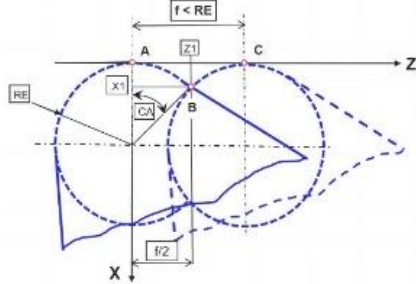
1.2 Az érdességképzés sajátosságai esztergáláskor

Az aktív élhossz tanulmányozása elsősorban azért fontos, mert a méret létrehozásában döntő szerepe van: a munkadarabbal érintkező csúcsgugár „egyetlen pontja” az ún. forgácsolópont, amelynek kis környezetében alakul ki a megmunkált felület mikrogeometriája, azaz a hullámossága és az érdessége.

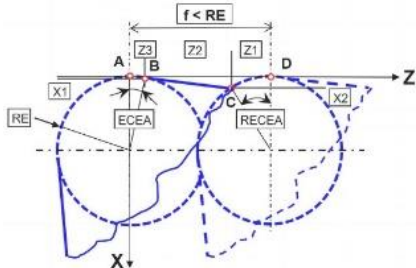
A szerszám aktív élszakaszainak meghatározása tehát korántsem jelenti azoknak az élrészeknek a számításba vételét, amelyek a szerszám élével létrehozott elméleti érdességet okozzák! Ez ugyanis az eszköznek az a több darabból álló vonala, amely közvetlenül a forgácsolópont közelében van, ezért annak geometriai elemei a munkadarabra átmásolódva felismerhetők a megmunkált felületen.

A forgácsleválasztás előzőekben felsorolt négyféle formája az esztergálás gyakorlatában összesen csak két alapesetre vezethető vissza, amelyet az 1. ábra kapcsán vettünk részletesen vizsgálat alá.

A 4. ábra a forgácsolólél érdességképző szakaszait mutatja be olyan esetekben, ahol az előtolás a csúcsgugárnál kisebb. A megadott geometriai feltételek mellett az érdesség (X tengely) nagyon kicsiny, ezért a vázlatok kissé torzítottak.



a.) csúccsal történő leválasztás



b.) három élszakasz dolgozik

4. ábra: Leválasztási módszerek az elméleti érdesség számításához

1.2.1 Szerszámcsúcson történő esztergálás

A csúcson történő forgácsoláskor a szerszám érdesség-előállító (rádiusos) élszakaszának (l_{erd}) hosszúsága a 4/a. ábra szerint

$$l_{erd} = 2 \cdot \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot CA \quad [mm] \quad (3).$$

Ezt azt jelenti, hogy minden esetben a rádiuszos élszakasz vagy meghatározó nyomot a megmunkált felületen. Megjegyezzük, hogy a (3) összefüggésben szereplő ún. érdességképző élszakasz nyilvánvalóan kétszerese az (1/b) egyenletben szereplő értéknek.

Általános szabályként fogalmazható meg a következő: minden olyan esztergálási műveletnél a szerszám csúcscsával történik az érdességképzés, ahol az előtolásra nézve az alábbi reláció teljesül:

$$f_{be} < f_{krit} = 2 \times RE \cdot \sin(ECEA) \quad [mm] \quad (4).$$

A (4) egyenletben előírt feltétel a gyakorlatban alkalmazott szerszámok igen nagy hányadánál teljesül. Különösen azoknál, ahol a lapkák alakjele vagy „T”, „D” vagy „V” betűvel kezdődik (ezek az ún. másolólapkák), vagy pedig a felsorolt alakok szerszámartói nem teszik lehetővé a kis mellékélszögek használatát. Az „S” alakú lapkák – geometriai kötöttségük folytán – részben ebbe a csoportba sorolhatóak, ha a tartó KAPR szöge kisebb 75° -nál.

Az elméleti érdesség ilyen esetekben a következőképpen határozható meg:

$$X1 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(CA)) \quad [\mu m] \quad (5a),$$

ahol az érintkezési szög (CA) a következő (4/a. ábra):

$$CA = \sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \quad [^\circ] \quad (5b),$$

azaz

$$X1 = R_{zel} = 1000 \cdot RE \cdot \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \right) \right) \quad [\mu m] \quad (5).$$

1.2.2 Több élszakasszal történő esztergálás

A több élszakasszal történő leválasztáskor 4/b. ábra szerint döntően a csúcsgugár, valamint a mellékél egy kis szakasza vesz részt az érdességképzésben. Ilyen esetben két feltételnek kell egyidőben teljesülnie, mégpedig

$$f_{be} > f_{krit} = 2 \times RE \cdot \sin(ECEA) \quad [mm] \quad (6a),$$

illetve

$$ECEA \leq CA = \sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \quad [^\circ] \quad (6b).$$

A (6b) egyenletben előírt (második) feltétel a gyakorlatban alkalmazott szerszámok kisebb hányadánál teljesül, nevezetesen azoknál, amelyekbe „C”, „E” vagy „W” alakú lapkák valók. Ezen lapkák csúcscsöge EPSR $75 \dots 80^\circ$, míg a többcélú felhasználtóság miatt a szerszámartók főélszöge $KAPR > 90^\circ$.

Az elméleti érdesség ebben az esetben a rádiusz és a mellékél „C” metszéspontjában alakul ki (4/b. ábra), meghatározása pedig a következő:

$$X1 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(ECEA)) \quad [\mu m] \quad (7a),$$

$$X2 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(RECEA)) \quad [\mu m] \quad (7b),$$

ahol a metszési szög (RECEA) a következő:

$$RECEA = \frac{\widehat{CD}}{RE} \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (7c),$$

ezzel pedig

$$X2 = R_{zelm} = 1000 \cdot RE \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\widehat{CD}}{RE} \cdot \frac{180}{\pi} \right) \right) \quad [\mu m] \quad (7)$$

A \widehat{CD} ívhossz és az elméleti érdesség (X_2) értékének meghatározása a [13] irodalomban található. Megjegyezzük, hogy az elméleti érdesség számítására több szakirodalomban (pl. [2], [4], [3], [14]) is hibás összefüggések találhatók.

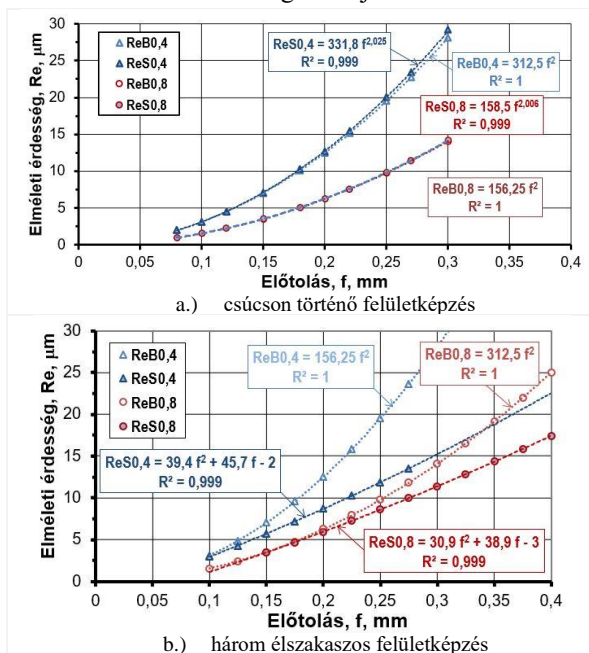
A három élszakaszos forgácsoláskor a szerszám összetett élvonalal veszt részt az érdesség kialakításában: a rádiusz két részletben, a mellékél pedig egy szakaszon dolgozik. Az ún. érdességképző rész (l_{erd}) összegzett hosszúsága a következő [13]:

$$l_{erd} = \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (ECEA + RECEA) + \sqrt{Z^2 + (X_2 - X_1)^2} \text{ [mm]} \quad (8).$$

Megjegyezzük, hogy a (2/b) összefüggésben szereplő előtolástól függő élszakasz és a (8) összefüggéssel kiszámolt érték között mindössze néhány tized mikrométer az eltérés.

1.3 Az elméleti érdesség és az előtolás összefüggése

Az előzőekben bemutatott kétféle leválasztási módszer teljesen különböző, a kétféle kialakítású szerszám által készített felület elméleti érdességét pedig teljesen eltérő képletekkel lehet meghatározni és modellezni. Az 5. ábra az előtolás függvényében mutatja be a Bauer-féle képlet szerint számított adatokat (ReB04 és ReB08), míg az általunk levezetett korrigált egyenletekkel számított adatokat az ReS04 és ReS08 görbék jelölik.



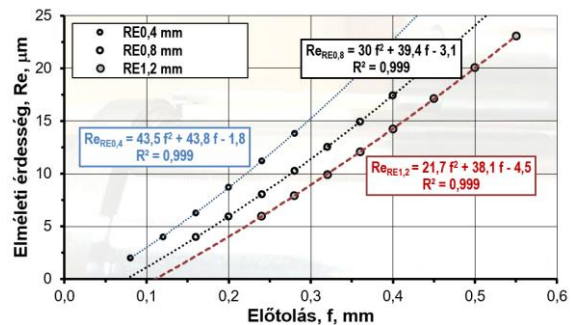
5. ábra: Az elméleti érdesség alakulása a kétféle leválasztási módszerrel

A grafikonok elemzéséből az derül ki, hogy

- a csúcson történő esztergáláskor (5/a. ábra) az elméleti érdesség hatványfüggvény jellegű. Ahogy az ábrán is látható, a Bauer összefüggés másodfokú parabola (totális szorosság mellett), az általunk levezetett (5a) képlet konstansa azonban nagyobb, mint a Bauer-féle $\frac{125}{RE}$ arány számolt értéke, kitévője pedig – a csúcsgugár nagyságától függően – nagyobb, mint 2,0. A szorosság értéke azért nem $R^2 = 1$, mert a konstansok és a kitevők egyaránt kerekített értékek;

- az 5/b. ábrán jól látszik, hogy a három élszakaszos felületképzéskor (tehát amikor a mellékél részt vesz a forgács leválasztásában) a Bauer-féle képlet nem alkalmas az elméleti érdesség leírására [13]. A 2. változat szerszámát ($ECEA=5^\circ$) alkalmazva az elméleti érdesség tökéletesen leírható. A polinom függvény (technikai parabola) szorosságának értéke azért nem $R^2 = 1$, mert a konstansok kerekített értékek.

Az aktív mellékél új megközelítést ad mind az elméleti érdesség számítására, mind pedig a szerszámok várható viselkedésének előrejelzésére. A (7) egyenlet alapján számított eredményeket a 6. ábra tartalmazza, mégpedig a kritikus előtolásnál nagyobb adatok esetében. A közölt elméleti érdességképletek konstansai kerekítettek, ezért a szorosság (R^2) kisebb, mint 1,00.



6. ábra: Az elméleti érdesség alakulása aktív mellékél esetén (Tartó: xCLxx jelű, lapka: „C” alakú)

2. ÉRDESSÉGI VIZSGÁLATOK KÜLÖNBÖZŐ LAPKÁK ESETÉN

Az esztergálásnál előforduló feladatokhoz különböző kialakítású szerszámok szükségesek attól függően, mekkora szerep jut a geometriai kötöttségeknek, a gyártási pontosságnak vagy az elérni kívánt felületi érdességnek. A korszerű gyártóipar azokat az előgyártmányokat részesíti előnyben, amelyeknél a kis ráhagyás („near net shape”-szemlélet) következtében a forgácsolási igény minimálásra csökkenthető. Ez egyben azt is jelenti, hogy csak az illesztésre szánt és/vagy szűk tűréssel ellátott (kritikus) felületek igényelnek precíz megmunkálást. Ennek a ténynek a felismerése vezette azokat a szerszámgyártókat, amelyek – a mérsékelt terhelés elviselésére képes – kisebb élhosszúságú és vastagságú lapkákat kezdtek forgalmazni.

A különféle kialakítású esztergaszerszámokkal elvégzett szisztematikus teszt sorozat a felületi érdesség alakulásának vizsgálatára fókuszált. A forgácsoló szerszámok ún. érdesség-tartó képessége az a tulajdonság, amely révén – egy meghatározott ideig előre tervezhetően – sikerül közel állandó értéken tartani a paramétereket [14]. A szerszám kopása, amely a forgácsoló-képesség romlásával (degradáció) függ össze, azonban a megmunkált felület érdességi adatait is befolyásolja. A rövid idejű tesztelésre való tekintettel az elhasználódásból következő felületi változásokat itt nem taglaljuk.

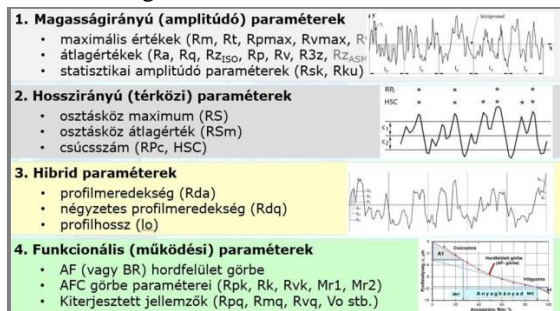
A különböző kivitelű és rendeltetésű lapkák összehasonlítása szárazon végzett hosszszesztergálással az 1. táblázatban közölt körülmények mellett történt. A táblázatba szerkesztett ábrákon jól látszanak azok a különbségek, amelyek a szerszámok teljesen eltérő forgácsolási sajátosságait okozzák. Az első változat kis csúcsgugara ($RE=0,4$ mm) és nagy mellékélszöge ($ECEA=32^\circ$) simításra és/vagy kontúresztergálásra való, amely a csúcson végzett leválasztás tipikus jellemzője. A

második mind simító, mind félsimító előtolásokkal végzett hossz- és keresztesztergálásra alkalmas, viszont a csúcshossz mellett a forgácsképzésben aktívan részt vesz a mellékél (szöge: $ECEA=5^\circ$) is, így nyomot hagy a megmunkált felületen.

1. Táblázat Összehasonlító vizsgálat adatai

Gép: BNC1840 (Próbadarab 11SMn30 (1.0715)
1. változat	2. változat
Tartó: SDJCR 2525 M11	Tartó: HCLNR 2525 M09
Lapka: DCMT11T304-PF Anyag: GC4315 (Sandvik)	Lapka: CNMG090408-FG Anyag: TT8115 (TaeguTec)
Jelleg: simító esztergálás	Jelleg: félsimító esztergálás
Előtolás, f, mm: 0,08...0,25	Előtolás, f, mm: 0,1...0,35
Fogásmélység, a, mm: 1,5 (egységesen)	
Forgácsolósebesség, v_c , m/min: 250 (egységesen)	
1. változat	2. változat

A $\varnothing 90 \times 120$ mm méretű próbadarabokat Perthen-Mahr CONCEPT érdességmérővel minden egyes felületet három, 120° -os szögosztásban lévő alkotó mentén vizsgáltuk meg, a felhasznált tapintó típusa: MFW-250:1 volt. A mérési eredményeket a Mahr cég MarWin szoftverével dolgoztuk fel.



7. ábra: Az érdességi jellemzők összegző csoportosítása

A program kirajzolja az értékelt (mért) profilt 3500...11000 pontban (5-5 alaphosszt felhasználva), 23-féle érdességjellemzőt határoz meg, amelyeket az ISO, az ASME és a JIS szabványa is definiál, és (akár 10 szinten) kiértékeli a profil hordfelületi (anyaghányadi) jellemzőit.

A tapintóval mérhető (2D-s) érdességi paraméterek összefoglaló csoportosítását a 7. ábra mutatja be a [15] alapján. Az ábrán szereplő paraméterek között néhány jól ismert van (R_a , R_q , R_z , R_t stb.), az összefoglaló azonban olyan jellemzőket is tartalmaz, amelyeket csak az ipar bizonyos szektoraiban (autó- és repülőgépgyártás, energetikai berendezések stb.) használnak például tömítési vagy kenési problémák megoldására.

Korábbi vizsgálatainkban már bemutattuk, hogy nem csak az azonos paramétercsoportba tartozó jellemzők (tehát pl. R_z - R_a) között szorosak az összefüggések [16], hanem

azt is bizonyítottuk, hogy a különböző csoportok egyes érdességi mérőszámai (pl. R_z - R_{Sm}) között is determinisztikus kapcsolat van [15].

A következő alfejezetekben azt igazoljuk, hogy ezek a korrelációs kapcsolatok törvényszerűek, bármilyen kialakítású szerszámról is van szó.

2.1 Az amplitúdó paraméterek vizsgálata

Az érdesség profilelemekből, azaz kiemelkedésekből és völgyekből épül fel, ennek képi (grafikus) megjelenítésére a magassági és a hosszirányú (térközi) paraméterek szolgálnak. A határozott élgeometriájú szerszámokkal végzett anyagleválasztás mindegyike periodikusan ismétlődő nyomokat hagy a felületen. Esztergálásnál a völgyek létrehozásában a szerszámcsúcshossz vesz részt, és azok olyan mértékben szabályosak, amilyen pontossággal történik azok kialakítása. Ez pedig összefügg a munkadarab anyagával, a szerszámmal, a megmunkálógéppel, rezgések fellépésével stb.

A magasságirányú paraméterek három nagy csoportba sorolhatóak (7. ábra). Az osztályozás elve a méréssel meghatározott adatok száma és az így eredményként kapott különböző jellemzők megbízhatósága. Ennek alapján a következő kategóriák léteznek:

- a paraméterek *maximális* értékének mérése (R_t , R_{pmax} , R_{vmax}) csupán *egyetlen* adatot állít elő, amely az egész mérési hosszra (l_m) vonatkozik. Az így nyert adat nem kellően megbízható, mert eseti jellemző,
- az *átlagos* értékek jóval pontosabbak, mert a mérési hossz általában *öt darab* alaphosszt (l_n) tartalmaz. Ilyen jellemzők például az elterjedt R_a , továbbá a felületről több információt magában foglaló R_q és R_z . Az utóbbi jellemzőnek több definíciója is létezik a világban, ezért a használatával vigyázni kell.
- az R_{sk} és R_{ku} *statisztikai* jellemzők ipari használata még nem elég gyakori. Ennek elsősorban az az oka, hogy az ismételt mérések során ugyanazon felületről nagyon szóródó értékeket ad a ferdeség (R_{sk}) és a lapultság (R_{ku}).

A következőkben a kiválasztott szerszámokat típusonként hasonlítjuk össze hatféle előtolásnál, 3-3 helyen megmérve.

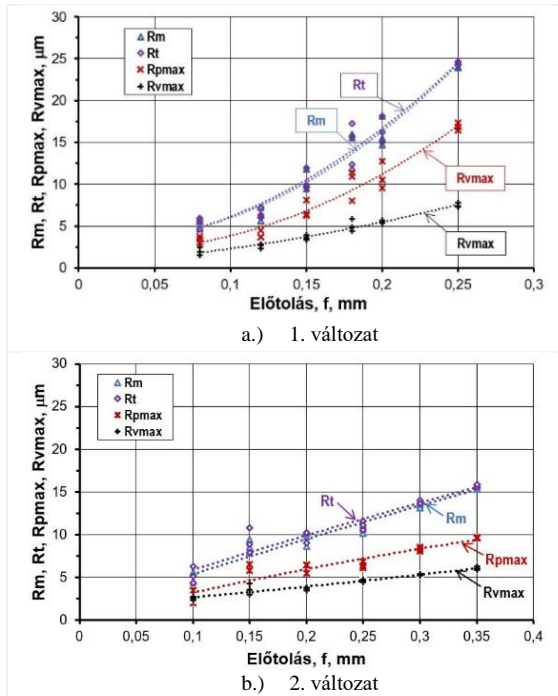
2.1.1 A maximális amplitúdó értékek alakulása

A kétféle kialakítással esztergált felületek maximális érdességi jellemzői a 8. ábrán láthatók az alkalmazott előtolás függvényében.

Mindhárom paraméter mért érdességi adatai nagyon szoros ($R^2 > 0,95$) másodfokú polinommal közelíthetők. A páros diagramon a mért jellemzők skálabeosztása azonos. A maximális érdesség paraméterekre a következő összefüggés írható fel:

$$R_t = R_{pmax} + R_{vmax} \quad [\mu m],$$

azaz a teljes profilmélység (R_t) a csúcshossz (R_{pmax}) és a völgyek (R_{vmax}) maximális értékeinek összege, amint ezt számadatokkal is bizonyítják a következő modellek.



8. ábra A maximális amplitúdó értékek az előtolás függvényében

Az ábrák összevetésekor a következő megállapítások tehetők:

- az 1. változatnál (csúcson történő esztergáláskor) az előtolás növelése az összes vizsgált paraméternél progresszív érdességromlással jár. A modelltől kapott összefüggések:

$$\begin{aligned} R_m &= 377 \cdot f^2 - 9,7 \cdot f + 3,2 \quad [\mu\text{m}] \\ R_t &= 457 \cdot f^2 - 38 \cdot f + 5,5 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{p\text{max}} &= 355 \cdot f^2 - 34 \cdot f + 3,5 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{v\text{max}} &= 102 \cdot f^2 - 4 \cdot f + 2,0 \quad [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

Látható, hogy a fenti jellemzők esetén a másodfokú tag együttthatója egy nagyságrenddel haladja meg a lineáris tag hasonló jellemzőjét, és minden egyes érdesség jellemzőnek minimumos szélsőértéke van az előtolás függvényében;

- a második változat esetén (ahol a mellékél aktívan vesz részt a forgácsképzésben) összességében degresszív változást mutat. A kapott összefüggések:

$$\begin{aligned} R_m &= 9,7 \cdot f^2 + 44 \cdot f + 1,1 \quad [\mu\text{m}] \\ R_t &= -12 \cdot f^2 + 44 \cdot f + 1,6 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{p\text{max}} &= -19 \cdot f^2 + 33 \cdot f + 0,1 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{v\text{max}} &= 7 \cdot f^2 + 11 \cdot f + 1,5 \quad [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

Ebből az derül ki, hogy az előtolás lineáris változása domináns jellegű, a másodfokú tag viszont lényegesen kisebb hatást gyakorol függvény értékére;

- a maximális érdesség jellemzők tekintetében az első változatnál az $R_m \approx R_t$ relációja állapítható meg, míg a 2. változatnál elvégzett vizsgálatoknál az R_t – nagy szóródása következtében – meghaladja az R_m értékeit;
- a diagramok összevetéséből az derül ki, hogy az adott érdességet nagyobb termelékenységgel lehet elérni a 2. változat alkalmazásával. Így például az $R_{t_{\text{előit}}=15 \mu\text{m}}$ esetében a növekedés akár az 50%-ot is elérheti.

Megállapítható, hogy a két változat érdesség-előállító képessége teljesen eltérő: míg a csúcson dolgozó

szerszámnál (a forgácsolásmélettel megegyezően) az előtolás „parabolikus” hatása látszik, addig a három élszakaszos leválasztásnál ez a jelleg nem figyelhető meg. A mért maximális értékek szóródása – a várakozással megegyezően – mindkét változatnál nagy mértékű.

2.1.2 Az átlagos amplitúdó értékek (R_a , R_q)

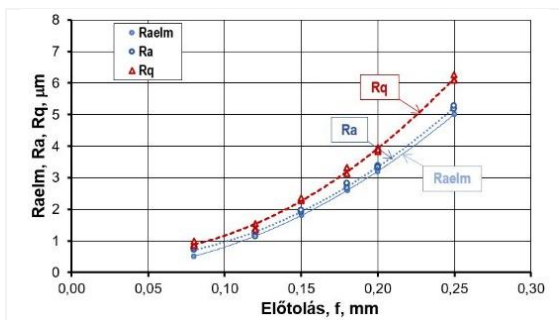
A magasságirányú értékek legelterjedtebb képviselője az *átlagos érdesség*, amely a vizsgált profilon az amplitúdó (y_i) *abszolút* értékeinek *átlagos* eltérése a középvonalhoz képest az l_n kiértékelési hosszra vonatkoztatva. Tekintettel arra, hogy a műszaki rajzok nagy hányadán az R_a érték a feltüntetett érdességi jellemző, az esztergálási műveletek előkészítésekor fontos feladatot jelent a felületi érdesség elméleti értékének (R_{aelm}) számítása. Az elméleti átlagos érdesség meghatározására sok képlet jelent meg a szakirodalomban [11, 17], jelen dolgozat az

$$R_{aelm} = \frac{1000 \cdot f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot RE} \quad [\mu\text{m}] \quad (9),$$

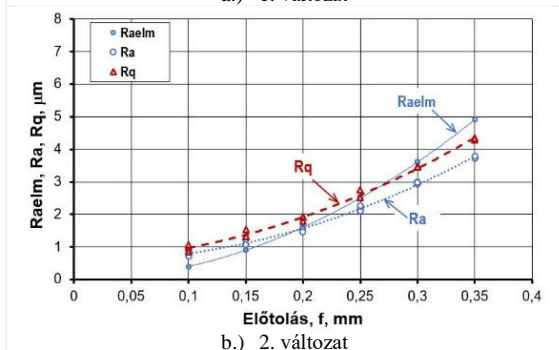
Brewer által bevezetett képlettel számol. A másik jól ismert paraméter a simasági mérőszám (R_q), amely a profil *négyszetes* eltérését mutatja a középvonalhoz képest, ezért nyilvánvalóan nagyobb értéket mutat. A 9. ábra a két eltérő változat átlagos érdességi és simasági mérőszám adatait szemlélteti (a regressziós görbék feltüntetésével), az átlagos elméleti érdesség számított értékét pedig szaggatott vonal jelzi. Az adatok összehasonlíthatósága érdekében a páros diagram azonos skálabeosztású.

Az ábrázolt görbék tendenciáit tekintve kiemelhető, hogy

- az 1. változatnál a (9) képlet alapján számítással ($R_{aelm} \approx 80,2 \cdot f^2 \quad [\mu\text{m}]$) kapott és a méréssel megállapított átlagos érdességi adatok alig különböznek egymástól. A simasági mérőszám természetesen nagyobb értéket mutat, és a mért R_q adatok feldolgozásakor – a kis előtolásoknál bekövetkező bizonytalan forgácsleválasztás miatt érthetően – a technikai parabolamodell mutatott nagyobb szorosságot;
- a több forgácsoló élszakasz miatt az elméleti érdesség számított értékei ($R_{aelm} \approx 40,1 \cdot f^2 \quad [\mu\text{m}]$) a 2. változatnál nem felelnek meg. A mért átlagos érdesség és a simasági mérőszám adatok előtolással való összefüggésének leírására szintén megfelelőbb a technikai parabolamodell;
- a vizsgált két változat közül a másodikkal érhető el kedvezőbb eredmények, ami természetesen az utóbbi kétszeres csúcscsugarával magyarázható. Megjegyezzük, hogy az élcsúcson végzett esztergáláskor a szerszám 8-18%-kal kisebb élszakasszal vesz részt a forgácsolásban (gyakorlati elnevezés szerint: „hegyesebb a szerszám”), mint amikor a mellékél is dolgozik.



a.) 1. változat



b.) 2. változat

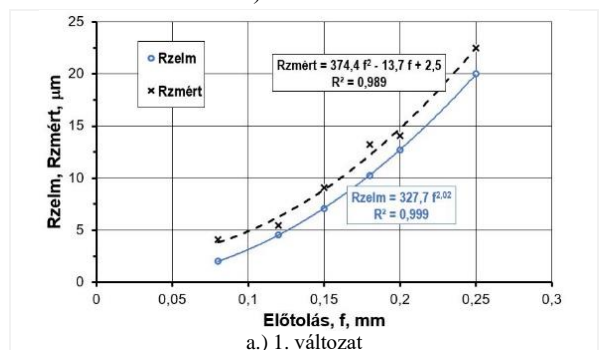
9. ábra: Az átlagos amplitúdóértékek az előtolás függvényében

Elterjedtsége következtében az átlagos érdesség nehezen kihagyható jellemző. Az Rq simasági mérőszám azonban nem csak korrektebb értékeket ad a felületre, hanem az átlagos érdességnél több információt tartalmaz is. Egyes szakértők szerint az Rq csak a kutatóknak megfelelő paraméter, a későbbiekben azt bizonyítjuk, hogy ez nem teljesen helyes álláspont.

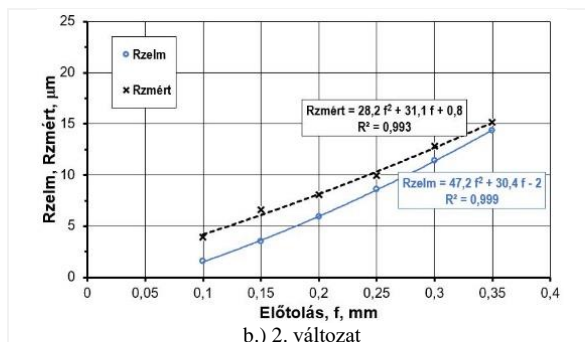
2.1.3 Egyenetlenség magasság, csúcsmagasság és völgymélység ($Rz - Rp - Rv - R3z$)

A magasságirányú (ún. csúcs-völgy) értékek meghatározó képviselője az *egyenetlenség magasság*. Definíció szerint az egyenetlenség magasság a vizsgált (például 5 darab) l_r alaphosszra megállapított egyenetlenségek *átlagértéke*, tehát az l_n kiértékelési hosszra értelmezett. A Rz definíciójából következik, hogy a csúcsmagasság (Rp) a legmagasabb, a völgymélység (Rv) pedig a legmélyebb távolságot jelenti a kiértékelési hossz.

Az előző alfejezet szerint az elméleti érdesség számítóképletei az esztergált profil egyenetlenség magasságát jelentik, mivel a periodikusan ismétlődő előtolások hozzák létre. A vizsgált kétféle szerszám esetén az elméleti értékek és a 18 darab méréssel meghatározott adat összehasonlítása a 10. ábrán látható. (Az adatok egyszerűbb összehasonlíthatósága érdekében a diagramok skálabeosztása azonos.)



a.) 1. változat

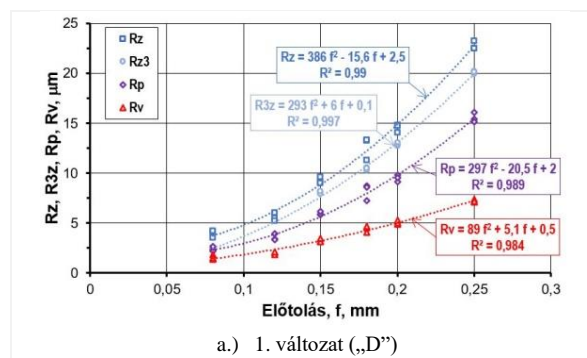


10. ábra: Az elméleti és a mért Rz értékek összehasonlítása

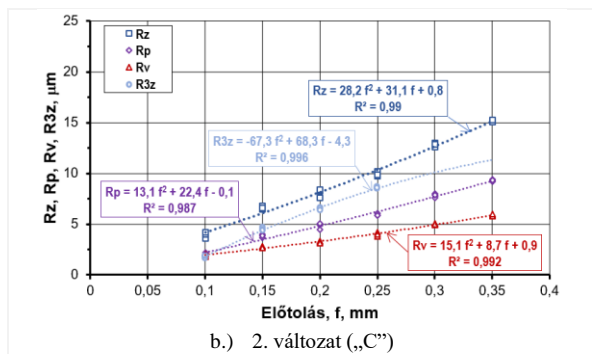
A diagramokból az alábbi következtetések vonhatók le:

- az első változat esetében a mért Rz érdesség jelentősen szóródik a beállított előtolásoknál, ezért a teljes vizsgálati tartományban csak a polinom alakú közelítés (10/a. ábra) alkalmazható. Az elméleti érdesség (Rzelm) szorossági indexe – bár (analog) függvénykapcsolatról van szó – azért nem $R^2=1$, mert a konstansok kerekítettek. Az elméleti és a mért értékek közötti eltérés egyenletes és átlagosan kb. 2,5 μm . A különbség elsősorban az anyagfeltapadásokkal magyarázható, de szerepet játszanak ebben a rezgések is;
- a jóval kisebb érdességet eredményező második változat az összes beállított előtolás függvényében adja meg az elméleti és a mért, kis szóródást mutató Rz adatokat (10/b. ábra). A vizsgált széles előtolás-tartományban az első és másodfokú tagok közötti különbség nem jelentős, ami arra utal, hogy a rádiusz és a mellékél egyenrangú mind a (7) összefüggés szerint számított elméleti, mind a méréssel meghatározott értékeknél. Az elméleti és a mért értékek közötti eltérés főleg a kisebb előtolásoknál jelentős. Ennek elsősorban az az oka, hogy az f_{krit} előtolásnál kisebbet is beállítottunk, ezért zártabb a forgácstér, így a leváló forgácsok megsértik a már kialakított felületet.

Az *alapérdesség magasság* (R3z) értelmezése nagyon hasonlít az Rz-re, azonban az R3z a *harmadik* legmagasabb csúcs és a *harmadik* legmélyebb völgy átlagos távolságát jelenti a kiértékelési hosszon értelmezve. Ennek értéke értelemszerűen kisebb, mint az Rz mért adata. A 11. ábra kétféle kialakítású szerszám esetén az egyenetlenség magasság kétféle értékét (Rz, R3z) és annak meghatározó paramétereit ($Rz=Rp+Rv$) szemlélteti. A diagramok skálabeosztása ezúttal is azonos.



a.) 1. változat („D”)



11. ábra: Az egyenetlenség magasság paraméterei

A páros diagramból az alábbi következtetések vonhatók le:

- a csúcsmagasságok (R_p) és völgymélységek (R_v) között nagyon szoros a kapcsolat, így azok képletének konstansai – kis hibával – az R_z függvény együtthatóit adják meg;
- az *első változatnál* az előtolás függvényében felírt törtkitevős hatványfüggvény modell (pl. $y = A \cdot x^B$ alakú) egyszerűbb ugyan, azonban nem tudja adekvát módon leírni a felületi érdesség változását. A 11/a. ábra polinomos közelítésekor minden egyes görbe alakulását döntően a másodfokú tagok határozzák meg, míg az elsőfokú konstansai egy nagyságrenddel maradnak el az előbbiektől;
- a *második szerszámváltozatnál* az előtolás másodfokú polinom alakban felírt modellje (pl. $y = A \cdot f^2 + B \cdot f + C$) nagyon szorosan ($R^2 > 0,98$) illeszkedik mind a négyféle mérési adathoz. A felületi érdesség alakulását ennél a konstrukciónál egyforma mértékben befolyásolják a lineáris és a másodfokú tagok. Az R_p és az R_v paramétereket leíró függvények szintén az egyenetlenség magasság képletének együtthatóit jelenítik meg. Az R_{3z} jellemző csak négy előtolás adatát (háromszori ismétléssel) tartalmazza, ugyanis nagy előtolásoknál ($f > 0,25$ mm) a műszer nem tud „harmadik” kiugró egyenetlenséget megállapítani, ezért a kapott modell is eltér az ennél a változatnál megszokottól.

Az elemzés azt mutatja, hogy az R_z egyenetlenség magasság paraméter a mért érdességi profil változásaira sokkal érzékenyebben reagál az R_a átlagos érdességhez viszonyítva. Az amplitúdók sokkal (legalább négyszer) nagyobbak, azonban a csúcsok és völgyek egyes pontjainak letapogatási/követési pontossága ingadozó, ezért a mérési eredmények szóródása is nagyobb. Az utóbbi években készült modelleken/rajzokon egyre több helyen van feltüntetve az R_z értéke. Egyértelmű elterjedését a tény hátráltatja, hogy az R_z definíciója néhány nemzeti (JIS) vagy szervezeti (DIN) szabványban eltérő.

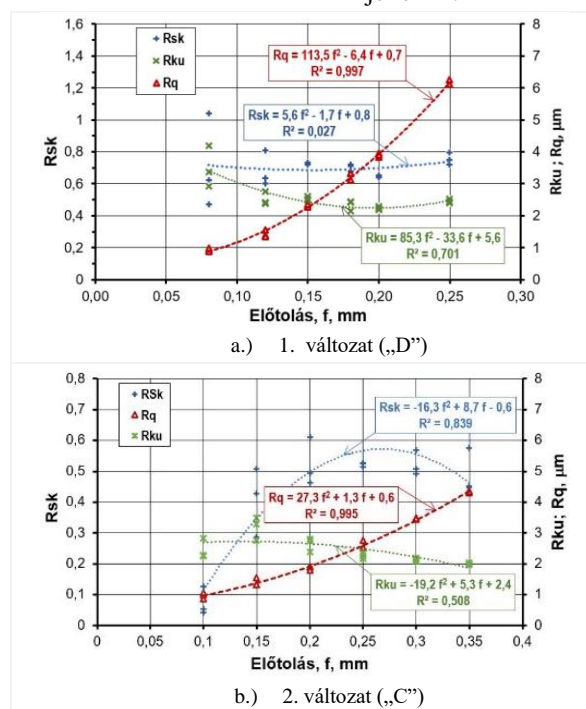
2.1.4 A statisztikai amplitúdóértékek alakulása

Az eloszlásokat leíró matematikai statisztikában az átlag, variancia, statisztikai nyomatók stb. jól ismert fogalmak. A megmunkált felületek érdességének magasságirányú eltéréseinek vizsgálatára szintén ezek alkalmazhatók, az alábbiak szerint:

- az eloszlásgörbéből az R_q átlagos érték számítható;
- az R_q^2 variancia (vagy szórásnégyzet) az eloszlás *másodrendű* nyomatóka;

- az R_{sk} ferdeség az amplitúdó-eloszlás *harmadrendű* centrális nyomatóka, amely a profilnak a középvonalhoz viszonyított szimmetriáját jellemzi. Azt írja le, hogy a megmunkált felület érdességének eloszlása balra ferde, azaz teli profilú ($R_{sk} < 0$), normális ($R_{sk} = 0$) vagy pedig jobbra ferde, vagyis üres profilú ($R_{sk} > 0$);
- az R_{ku} lapultság (más helyeken csúcosság) az eloszlás alakját „függőlegesen” leíró mutatószám, amely az eloszlásnak *negyedrendű* centrális nyomatóka. Normál eloszlásnál értéke $R_{ku} = 3$, nagy kiemelkedések vagy bemélyedések esetén $R_{ku} > 3$, széles („lapos”) eloszlási görbék esetén $R_{ku} < 3$ lehet;
- a mért simasági mérőszám (R_q) adatok jelentőségét az növeli, hogy a ferdeség kiszámításakor a harmadik, az R_{ku} értékeknél pedig a negyedik hatványon szerepelnek.

A statisztikai amplitúdó értékeket, valamint a simasági mérőszám mért adatait a 12. ábra összesíti. A jobb összehasonlíthatóság érdekében a diagramokat a két változatnál azonos skálabeosztás jellemzi.



12. ábra A statisztikai paraméterek alakulása

A diagramok elemzéséből levonható következtetések az alábbiak:

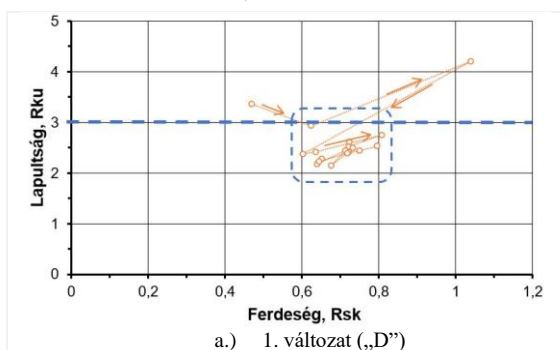
- az *első változatnál* (12/a. ábra) a ferdeséget nagy pozitív értékek ($R_{sk} \approx 0,7$) jellemzik, alig kimutatható változással, a lapultsági értékek pedig $R_{ku} \approx 3$ -ról kicsit csökkennek az előtolás függvényében. Az R_q adatok nagyon jó szorossággal illeszkednek egy technikai parabolához, amelyben a másodfokú tagnak meghatározó szerepe van;
- a *2. változatnál* (12/b. ábra) a ferdeség eltérően viselkedik, mert a legkisebb előtolásnál nagyon kis értéket ad, majd egy maximum elérése után ($R_{sk} = 0,4 \dots 0,6$ értékek között) enyhén csökkenő tendenciát mutat. Az *első változathoz* hasonlóan a lapultsági értékek folyamatosan csökkennek. Az R_q adatpontok nagyon szorosan illeszkednek ahhoz a másodfokú

polinom modellhez, amelyben szintén a másodfokú tagnak van meghatározó szerepe.

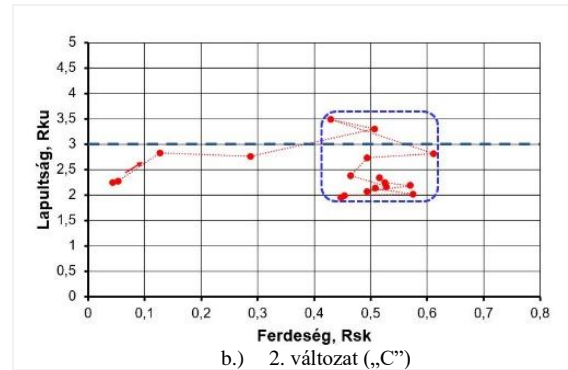
A statisztikai amplitúdóértékek összefüggő rendszert alkotnak, ha egy felületszakasz egy forgácsolási adatbeállításánál *egyidejűleg* mért ferdeség és lapultság mérőszámait közös koordináta-rendszerben ábrázoljuk [12, 18]. Az így keletkező diagram az ún. topológiai térkép, amely a különböző megmunkálási eljárásokra jellemző, egyedi Rsk-Rku adatpárosokat produkál. A szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett forgácsolási módszerekre (esztergálás, fúrás, marás stb.) az Rsk ±1,5 és Rku 2...7 tartományba eső adatok a tipikusak. A szakirodalmak szerint minél inkább jobbra dőlő, azaz a pozitív Rsk tartományban és minél lentebb (Rku < 3) helyezkedik el a mért felület textúrájának paraméterpárosa, annál kedvezőtlenebbek a működés közbeni tulajdonságai (súrlódás, kopás, kenés stb.). Természetesen ritkán szoktak az alkatrész szempontjából fontos, működő felületeket csak esztergálással vagy marással létrehozni.

A 13. ábra a kétféle szerszámmal esztergált 18-18 felületszakasz összetartozó adatait mutatja be. A topológiai térképek feltüntetik a normál eloszlás Rku=3 értékét, valamint az induló (legkisebb) előtolásoknál kapott értékeket, a pontokat összekötő vonalakból pedig az előtolás fokozására bekövetkező tendenciákról vonható le következtetés. A diagramok elemzéséből az derül ki, hogy

- a vizsgált szerszámok mindegyike szinte kivétel nélkül a Rku < 3 paraméterű felületet állít elő, ami a simító vagy félsimító esztergálással megmunkált felületeknél *általánosnak* mondható;
- az 1. változatot (13/a. ábra) a lapka csúcsgarához (RE = 0,4 mm) igazodóan egy kisebb (f = 0,08...0,25 mm) előtolás-tartományban teszteltük, és nagy, pozitív (Rsk 0,6...0,8) ferdeségeket és Rku 2...3 határok közötti értékeket mértünk, vagyis ezzel a szerszámmal esztergált felületek – a kiemelkedéseik miatt – kopásra hajlamosabbak;
- a második változatnál a csúcsgár 0,8 mm volt, ezért az f = 0,1...0,35 mm beállítási határok között esztergáltunk (13/b. ábra). Kis előtolásoknál (f ≤ 0,15 mm) nagyon kis ferdeséget (Rsk 0,05...0,5) mérhettünk 2,2...3,5 lapultsági értékek mellett, ami a megnövelt csúcsgárnak volt köszönhető. A növelt előtolásoknál a ferdeség fokozódását (Rsk 0,45...0,6) tapasztaltuk. Az Rsk-Rku pontpárok vonalas összekötéséből jól látható, hogy növekvő előtolásoknál egyre kisebb Rku értékek mutathatók ki.



a.) 1. változat („D”)



b.) 2. változat („C”)

13. ábra: Esztergált felületek topológiai térképei

Ezek alapján úgy véljük, hogy a statisztikai amplitúdó-paraméterek alkalmazása megfelelő eszköz a különféle kialakítású szerszámok közötti különbség egyértelművé tételéhez. Amennyiben az egyes beállításoknál a méréseket legalább háromszor megismételjük, az adatok szórása ellenére is viszonylag tiszta képet kapunk a tesztelt konstrukció érdesség-előállító képességéről. A topológiai térkép felhasználható a hosszabb távú üzemeltetés szempontjait figyelembe vevő adatkombinációk kiválasztására is.

2.2 A hosszirányú (térközi) paraméterek vizsgálata

Az érdességi profilon jól felismerhető szerszámnyomok a hosszirányú paraméterekkel jellemezhetők, ezért a beállított előtolással összefüggő térközi jellemzők akár triviálisnak is tekinthetők. Az érvényben lévő szabványok a szűrt profil négy, hosszirányú jellemzőjét különböztetik meg az l_n alaphosszon értelmezve, mégpedig

- az átlagos osztástávolság (RSm) a középvonal feletti kiemelkedéseknek és az alatta lévő mélyedéseknek (azaz a profilelemeknek) az érdességi karcokra mérőleges, átlagos szélessége;
- az osztás (RS), ami teljesen hasonlóan értelmezett, azonban a szerszám és a megmunkált felület pillanatnyi állapotával (kopás, rezgés stb.) függ össze, az RS általában kisebb az RSm-nél, azonban egyes esetekben meg is haladhatja annak értékét;
- az R_{Pc} paraméter a periodikus érdességi profil legnagyobb kiemelkedéseinek száma, 10 mm hosszra vonatkoztatva;
- a HSC – a mérőszoftver által kiválasztott mélységben – a nagyobb kiemelkedések számát adja meg, szintén 10 mm hosszra.

A definíciókból is jól látható, hogy a kiemelkedések egységnyi hosszra vonatkoztatott száma kettős természetű: a legnagyobb csúcsok inkább az amplitúdó- paraméterek kategóriájába tartoznak, a vizsgálat 10 mm-re vonatkoztatott értéke pedig egyértelműen térközi jellemző.

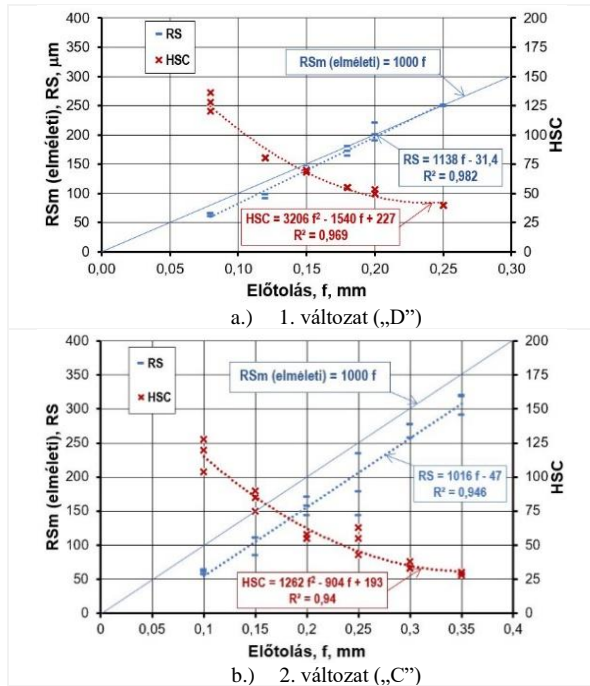
A vizsgált szerszámok érdesség-előállító képességét jelen anyagunkban csak két paraméterével jellemezzük. Ennek az oka, hogy az átlagos osztás (RSm, μm) elméletileg az előtolással egyezik meg (millimikronban kifejezve), a R_{Pc} pedig annyit jelez, amennyi előtolás nyom jut 10 mm-re. Képletben ez a következőképpen írható:

$$RSm \cdot R_{Pc} \cong 10000 \quad [\mu\text{m}] \quad (10),$$

mivel azonban az R_{Pc} (miként a HSC is) csak *egész* szám lehet, ezért a közölt képlet csak *közéltőleg* érvényes.

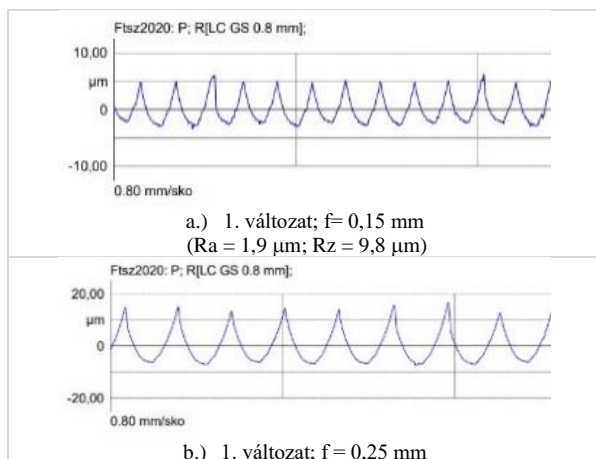
A 14. ábra az RS osztásértékek és a HSC kiemelkedések számának alakulását szemlélteti az előtolás függvényében.

A diagramokat elemezve az állapítható meg, hogy a kétféle konstrukció között csak nagyon kis eltérés fedezhető fel, azok kialakulásáért is döntően a mérési adatok szóródása a felelős. A csekély különbség érthető is, hiszen a hosszirányú jellemzőket egyedül a forgácsolás kinematikája, mégpedig az egy fordulatra jutó előtolás határozza meg.

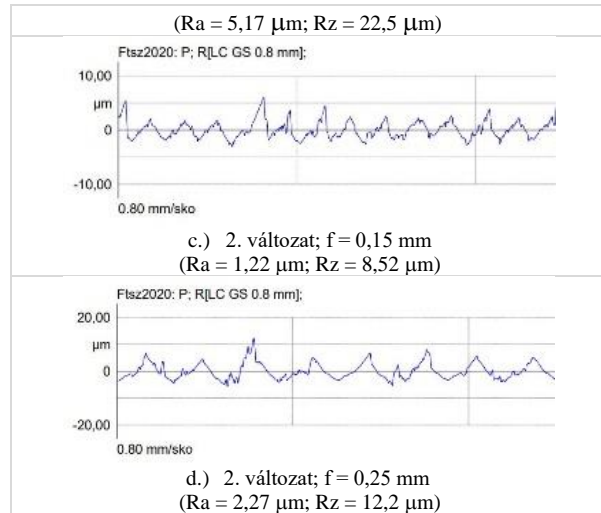


14. ábra Az esztergált felületek térközi paraméterei

A 15. ábra előtolás páronként, egyező „cut-off” mellett szemlélteti a felület egyenetlenségeit, míg a valós értékekről a diagramoknál feltüntetett érdességi mérőszámok adnak tájékoztatást. A felvett profilok főleg a nagyobb előtolás esetén igazolják meggyőzően a rádiuszon történő forgácsolás tényét az 1. változatnál, míg a több élszakaszos forgácsolásnál természetesen a felületi profil több részletből tevődik össze. Ezzel magyarázható az RS paraméter eltérő alakulása is, ugyanis a 2. változatnál az osztások „megrövidülnek” a mellékél aktív szerepe miatt.



b.) 1. változat; f = 0,25 mm



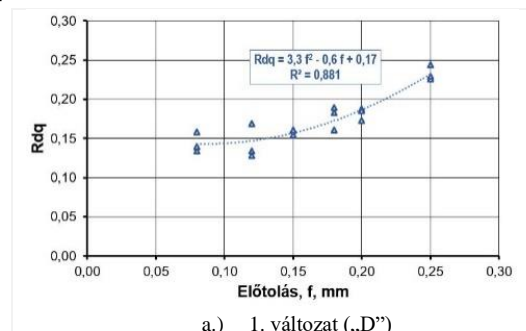
15. ábra: Az esztergált felületek szűrt profildíagramjai

2.3 Az érdesség hibrid paraméterei

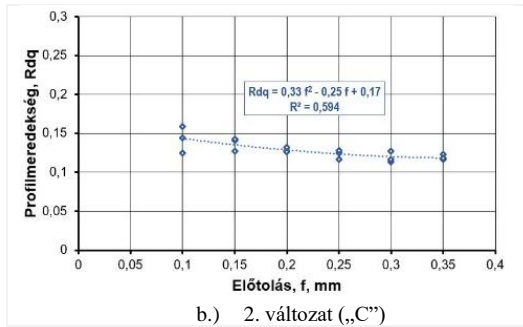
A kevert paraméterek *egyesítik* az amplitúdó-paramétereket és a térközi jellemzőket, ezért bármelyikük megváltozása befolyásolja a (majdani kapcsolódó) felület olyan fontos tulajdonságait, mint például a súrlódást, a terhelés közbeni rugalmas deformációt, a felület tribológiai viselkedését vagy éppen a kenési sajátosságait.

A korszerű érdességmérő műszerek egy-egy profilról legalább 10 000 pontot rögzítő mintát vesznek fel, ezért a hibrid paraméterek kiértékelése meglehetősen számításigényes. Leggyakrabban kétfajta paramétert alkalmaznak: az egyik a vizsgált profil meredekségét fejezi ki (R_{dq}), míg a másik a megmunkált profil hosszára utal (l_o , R_{lo}). Megjegyezzük, hogy a különböző műszergyártók (a nemzeti szabványoknak megfelelően) más-más érdességjellemzők szoftveres számítását részesítik előnyben.

Az általunk vizsgált hibrid paraméter a profilmeredekség, amely alapesetben két, egymást követő profilpont függőleges (δ_{yi}) és vízszintes (δ_{xi}) távolságának hányadosát jelenti, azaz a profilt alkotó egyenesek hajlásszögének tangensét adja meg. A négyzetes meredekség (R_{dq}) a profilmagasság *négyzetének átlagos* változását adja meg az értékelési hosszra vonatkoztatva [19].



a.) 1. változat („D”)



b.) 2. változat („C”)
 16. ábra: A profilmerekség alakulása

A 16. ábra az előtolás függvényében adja meg 18-18 felület négyzetes meredekségének értékeit. A diagramok tanúsága szerint a kétféle kialakítás szerszám teljesen másként viselkedik. A növekvő előtolások beállításakor az első változat egyre növekvő meredekségű profilokat állít elő, míg a több élszakasszal dolgozó konstrukció alkalmazásakor a meredekség folyamatosan csökken. Ezek a tendenciák jól felismerhetők a 15. ábrán szereplő profildiagramok képein is.

Az elemzésre kiválasztott Rd_q hibrid paraméter értékei kis változást mutatnak, viszont a szóródásuk nagy. A kétféle szerszám összehasonlításához mégis megfelelő, mert eltérő esztergálási körülmények között is jól tükrözi a változatok eltérő érdesség-előállító képességét.

2.4 Az érdesség funkcionális paraméterei

Az alkatrészek kritikus felületeit az előzőleg részletesen tárgyalt magassági, térközi és hibrid paraméterekkel jellemezzük, ellenőrizzük és minősítjük, a funkcionális érdességi paraméterekből pedig a működés közbeni viselkedésükre következtethetünk [8].

A 17. ábra az ISO 13565-2 szabvány szerint három sávra osztott profildiagramot mutat be a [20] alapján. A függőleges tengelyen, tetszőleges mélységben felvett „c” vonal pedig azt mutatja meg, milyen százalékos arányt ér el ($Rmr(c)$, %) az $L_1 \dots L_n$ metszett szakaszok összege az értékelési hosszhoz (L_n) viszonyítva. A különböző (felvett) metszésekkel tagolt felület legkiemelkedőbb része a csúcsható, az alatta levő, leginkább terhelhető övezet a magzóna, míg a völgyzóna a mélyedéseket tartalmazza.

A hordfelületi görbe (másképpen AFC-diagram) ordináta irányban a magassági (amplitúdó) eltéréseket tartalmazza, a következő elnevezésekkel:

- Rpk : redukált csúcsmagasság, azaz a csúcsható kiemelkedő csúcsainak (a magprofil feletti) átlagos magassága,
- Rk : magzóna-érdesség, azaz a mag profiljának érdességi mélysége,
- Rvk : redukált völgymélység, azaz a völgyzóna átlagos völgymélysége (a magtól az anyag megmunkálás által nem érintett vonaláig tart).

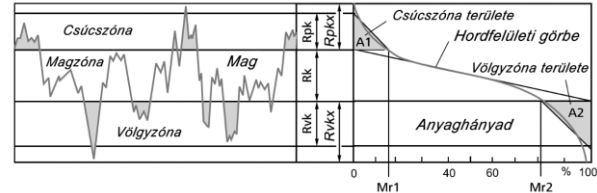
Megjegyezzük, hogy az $Rpkx$ (legmagasabb profilú csúcsmagasság) és a $Rvkv$ (legmélyebb völgymélység) paramétereit az ISO 13656-2 tartalmazza, amelyet a különleges rendeltetésű felületek gyártására (ún. plateau finishing operations) és minősítésére kidolgozott ISO 13656-3 szabványban foglalnak össze.

Az AFC diagram az amplitúdó irányában az alábbi közelítéssel írható le:

$$Rz \approx cmax \approx Rpk + Rk + Rvk \quad [\mu m] \quad (11),$$

ahol a profilmélység maximumát ($cmax$) első közelítésben a csúcs-, mag- és völgyzóna alkotják, ez a méret azonban *csak közelítőleg* egyenlő az Rz egyenetlenség magasság értékével.

A hordfelületi görbe abszcisszáján az *anyagarány* százalékos értékei szerepelnek, amelyek a következők:



17. ábra: A hordfelületi görbe jellemzői

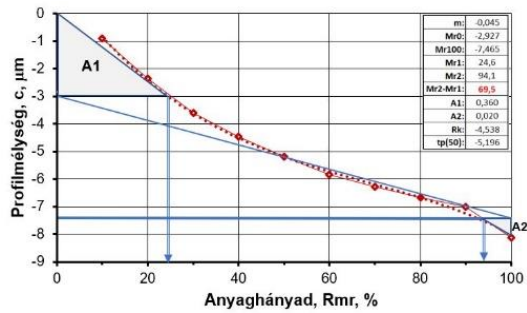
- magzóna: a *legkisebb* emelkedésű egyenes *minimum* 40%-os szakasza, amely az anyagarány- görbét magterületre és további két zónára osztja fel,
- $Mr1$: a legkisebb anyagarány a magérdesség felső határán, %,
- $Mr2$: a legnagyobb anyagarány a magérdesség alsó határán, %.

A felület pillanatnyi működésével és jövőbeni viselkedésével kapcsolatban a hordfelületi görbe két jellegzetes területe a csúcsható (jele: A1), a felület elhasználódásának leginkább kitett része, míg a másik anyaghiányos tartomány a kenőanyag befogadására alkalmas a völgyzóna (jele: A2).

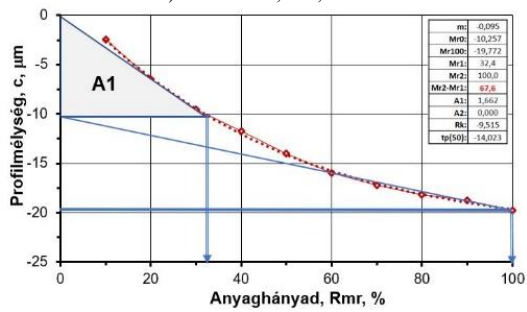
A kétféle kialakítású szerszámmal esztergált felületek 3-3 mérésből átlagolt hordfelületi görbét a 18. ábra mutatja be. Megjegyezzük, hogy az így ábrázolt görbe és a kiszámolt értékek tíz darab összetartozó $c_i - Rmr_i$ adatpárosa épülnek, ezért korlátozott pontosságúak. Itt kell megjegyezni, hogy egyes mérőszoftvereknél a funkcionális paraméterek szempontjából újra lehet értékelni az egyszer már felvett érdességi adatokat, mégpedig a „Magérdesség” rádiógombra történő kattintással. Ilyenkor Rk , Rpk , Rvk , $Rpkx$, $Rvkv$, $Mr1$, $Mr2$, $A1$, $A2$, Vo jellemzőket is kiszámítja a program.

A 18. ábra diagramsorozatának elemzéséből az alábbi következtetések vonhatók le:

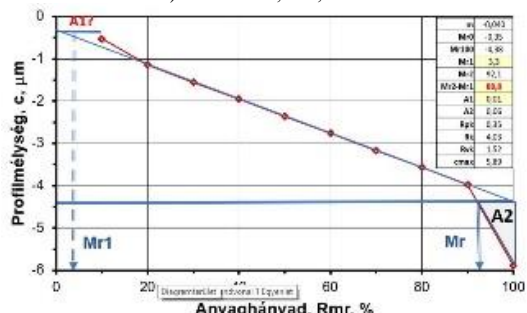
- a diagramokon csak részben ismerhető fel a „klasszikus” hordfelületi görbe (amelyet alakja miatt szokás „S” görbének is nevezni), ami a mintavételezés diszkrét értékeivel ($\pm 10\%$) függ össze;
- az 1. változatnál meghatározóak a profilmélység nagy értékei, ami a forgácsleválasztás körülményeivel (nevezetesen a beállított előtolással és a csúcsható méretével) függ össze. Ennek az a következménye, hogy a magzóna anyaghiányada 70% alatt marad, míg a legnagyobb előtolás beállításakor az A2 zóna annyira eltörlődik, hogy az esztergált felület kenése nehézségekbe ütközik;
- a második változat esetében sokkal kedvezőbbek a hordfelületi adatok. A profilmélység nagyarányú változása következtében az Rpk redukált csúcsmagasság értéke, illetőleg a kopásra leginkább hajlamos csúcsható (A1) területe drasztikusan lecsökken. Ez különösen kis előtolások alkalmazásakor figyelhető meg.



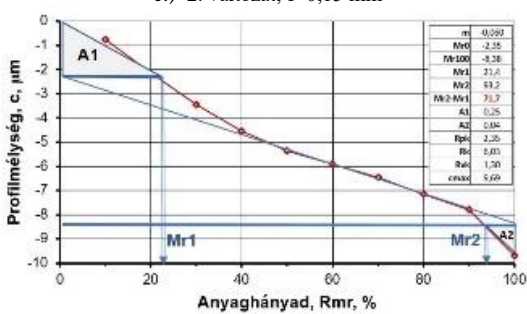
a.) 1. változat; $f=0,15$ mm



b.) 1. változat; $f=0,25$ mm



c.) 2. változat; $f=0,15$ mm

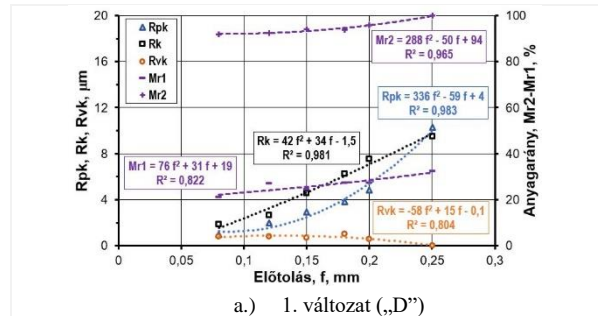


d.) 2. változat; $f=0,25$ mm

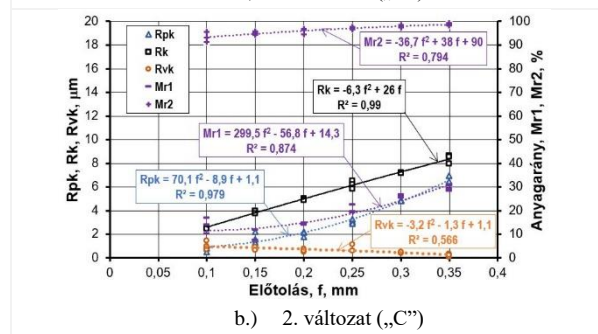
18. ábra: Az esztergált felületek hordfelületi görbéi

A hordfelületi görbéket jelen szócikkben a szerzők ötféle paraméterrel jellemzik: az amplitúdó-eltérések, melyek az Rpk, Rk, Rvk adatok, illetve az anyagarány Mr1 és Mr2 értékei.

A 19. ábra az előtolás függvényében adja meg a jellemzők értékeit és a másodfokú polinommal történő közelítésüket.



a.) 1. változat („D”)



b.) 2. változat („C”)

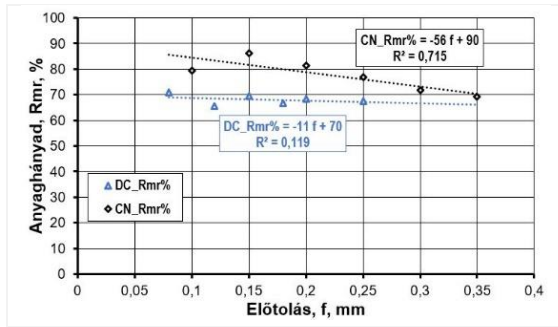
19. ábra: A hordfelületi jellemzők alakulása

A páros diagramok összevetésekor a következőket állapíthatjuk meg:

- mindkét kialakításnál az előtolás és az Rk, Rpk valamint Mr2 jellemzők között nagyon szoros összefüggés állapítható meg, míg az Rvk és Mr1 paraméterek jobban szóródnak, ez magyarázza az R^2 jellemző csökkenését;
- a két szerszám eltérő forgácsolási viselkedésére jól rávilágít a profilmélység összetevőinek (Rpk, Rk, Rvk) alakulása és egymáshoz viszonyított aránya. Míg a magzóna és a redukált csúcsmagasság érdességét egészen más képletek írják le, addig a redukált völgymélység összefüggései hasonlóak;
- az anyagarányok (Rmr, %) közül az előtolás növekedésével (az Rpk és az Rk határai módosulása következtében) az Mr1 értéke mindkét változatnál növekszik, viszont az Mr2 anyagarány mindkét lapkánál hasonlóan alakul.

A ténylegesen teherviselő anyaghányadot (a magérdességet) a legnagyobb és a legkisebb Rmr arány különbsége adja meg. A precízebb számítás érdekében ezt szoftveres úton úgy oldottuk meg, hogy a „Magérdesség” paranccsal a két változattal készített próbadarabok felületeit újra kiértékeljük és a felületek 3-3 pontján mért hordfelületi görbék adatait átlagoltuk.

A vizsgált változatoknál megállapított Mr2-Mr1 értékeket a 20. ábra tünteti fel az előtolás függvényében. Megjegyezzük, hogy „C” alakú lapkánál sokkal jobb anyaghányad-érték lett volna elérhető, ha az $f=0,1$ mm előtolás adattól eltekintünk (mert $f < f_{krit}$ esete áll fenn). A hordfelület természetéből fakadóan egyébként a kisebb anyaghányad a növelt előtolásoknál mérhető. A két változat összehasonlításakor kb. 14...18% eltérés mutatkozik a második változat javára.



20. ábra: A hordfelületi jellemzők alakulása

A kapott eredmények azt igazolják, hogy a kétféle szerszámialakítás megkülönböztetésére a funkcionális paraméterek jól alkalmazhatóak. A több élszakaszon forgácsoló konstrukció kisebb profilmélységet alakít ki, a magzóna által kitöltött anyaghányad pedig jobban ellenáll a mechanikai igénybevételeknek és az egymáson elcsúszó/gördülő felületek érintkezéséből és kopásából származó (tribológiai) kölcsönhatásoknak.

ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

Jelen anyagban összefoglaltuk az esztergáláskor alkalmazott négyféle forgácsleválasztási változatot, külön kiemelve és részletezve a gyakorlatban előforduló két leggyakoribb módszert. Ezek nyomán az alábbi eredményekre jutottunk:

- számszerű vizsgálatokkal mutattuk ki az alkalmazott szerszám forgácsolásban részt vevő élszakaszának az állandó és a változó forgácsolási adatoktól való függését. Megállapítottuk, hogy az előtolás növekedése elhanyagolható mértékű változást okoz, viszont a fogásmélység és a lapka alakja (azaz élszögei) döntően befolyásolják a fogásban lévő aktív élhossz nagyságát. Két általános felhasználású („D” és „C” alakjelű) lapkák példáján keresztül elemeztük az egyenes élszakaszok és a rádiusz szerepét a leválasztási folyamatban;
- geometriailag modelleztük a szerszámok érdesség-előállító képességét, levezettük azokat a különbségeket, amelyek a szerszámcsúcson, illetve a mellékéllal történő esztergáláskor vannak az általunk célszerűen választott lapkák esetében;
- többszörösen ismételt, szisztematikus kísérletekkel határoztuk meg az elméleti összefüggések és egy korszerű műszerrel mért értékek alakulását. Feltártuk és célszerű modellekkel írtuk le 23-féle érdességi paraméter változásait a választott kétféle szerszám típussal esztergált felület esetében;
- részletesen tárgyaltuk a négyféle érdességi csoport jól mérhető paramétereit. A vizsgált szerszámok eltérő viselkedése kapcsán felhívtuk a figyelmet a topológiai térkép és a funkcionális érdességi jellemzők fontosságára;
- vizsgálataink alapján a „D” alakú lapka jól alkalmazható a kontúrmásolási feladatoknál, viszont a félsimító hossz- és keresztesztergáláskor a „C” jelű változat felhasználása minden szempontból jól indokolható.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Brammertz, P.H.: Die Ermittlung der Oberflächenrauigkeit beim Feindreihen 20. Forschungsbericht des Lab. für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, Girardet, Essen, 1962
- [2] Kardos, Á. (1962) A mellékél elhelyezési szög hatása alumíniumötvözet esztergáláskor *Gép*, pp. 217-233.
- [3] Sokolowski, A.P.: Präzision in der Metallbearbeitung, VEB Verlag Technik, Berlin, 1955.
- [4] Makarov, A.D.: Optimizacija processzov rezanyija, Moszkva, 1976. p. 101.
- [5] Brewer, R.C.; Rueda, R. (1964) Die Ermittlung der wirtschaftlichen Arbeitsbedingungen beim Drehen, *Werkstattstechnik* 54:6
- [6] Gribovszki, L.: Gépipari megmunkálások, MK, Budapest, 1977.
- [7] Bus, C.; Touwen, A.L.; Veenstra, P.C.; Van der Wolf, A.L. (1971) On the Significance of Equivalent Chip Thickness. *Annals of the CIRP*, 44:121-124.
- [8] Box G.; Wilson K. (1951) On experimental attainment of optimum conditions *J. Royal Statist. Soc.*, 13(1):1-45.
- [9] Drégelyi-Kiss, Á: (2023) On the Optimization of Resistance Projection Welding Process, *Material And Mechanical Engineering Technology* 5(3):3-10
- [10] De Chiffre, L. (1999) Industrial survey on ISO surface texture parameters, *Annals of the CIRP*, 48(3):74-77
- [11] B. Griffiths: Manufacturing Surface Technology, Penton Press, London, 2001.
- [12] G.P. Petropoulos; N.M. Vaxevanidis; C.N. Pandazaras; A. Antoniadis (2006) Multi-parameter identification and control of turned surface textures *Int J Adv Manuf Technol* 29:118–128.
- [13] Sipos, S. (2019) Új érdességi számítóképletek esztergálásnál, Budapest, pp. 32
- [14] Sipos, S.; Palásti-Kovács, B.; Horváth, R. (2015) Forgácsolótechnológiák és szerszámok, Elektronikus jegyzet, ÓE 3057, Budapest
- [15] Sipos, S.; Rácz, V.: Esztergált felületek érdességi összefüggései Oktatási segédlet, ÓE/BGK, Budapest, 2021. pp. 38.
- [16] B. Palásti-K.; S. Sipos; Á. Czifra (2012) Interpretation of „Rz=4xRa” and other roughness parameters in the evaluation of machined surfaces. *Proceedings of the 13th International Conference on Tools, ICT-2012*, pp. 237-244.
- [17] J-E. Stáhl; F. Schultheiss; S. Hägglund (2011) Analytical and Experimental Determination of Ra Surface Roughness during Turning, *Procedia Engineering* 19:349-356
- [18] Horváth, R.; Sipos, S. (2011) Topológiai térképek alumíniumötvözet finomesztergálásához. *Óbuda University e-Bulletin* 2(1):355-363.
- [19] E.S. Gadelmawla et.al (2002): Roughness parameters. *J. of Mat.Proc.Techn.*, 123:133-145.
- [20] Szalóki, I.; Sipos, S.; Viharos Zs. (2016) Szintaktikus fémhabok marással megmunkált felületi struktúrájának elemzése. *Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki* Paper 50
- [21] 3 steps to Understanding Surface Texture, *Digital Metrology Solution*, May 26, 2014
- [22] R. Horváth; B. Palásti-Kovács; S. Sipos (2011) Optimal tool selection for environmental-friendly turning operation of aluminium *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 39(2):257-263.
- [23] Sipos, S.; Rácz, V: TaeguTec és ISCAR szimpózium, Budapest/Nagytarcsa, 2023/2024.
- [24] C.L. He; W.J. Zong; J.J. (2018) Zhang: Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 129:15-26.
- [25] K. Zak; W. Grzesik; S. Brol (2009) Finish turning of nodular cast iron using different cutting tool inserts, *Archivum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 29(4):21-32