Szent István Egyetem

ESZTERGÁLT MŰSZAKI MŰANYAG FELÜLETEK MIKROTOPOGRÁFIAI JELLEMZŐI

Doktori (Ph.D) értekezés

Farkas Gabriella

Gödöllő
2010

A doktori iskola

megnevezése: **Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

tudományága: **Agrárműszaki Tudomány**

vezetője: **Dr. Farkas István**
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Környezetipari Rendszerek Intézet
Gödöllő

Témavezető: **Dr. habil. Kalácska Gábor**
egyetemi tanár, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet
Gödöllő

Társ-témavezető: **Dr. Palásti Kovács Béla**
főiskolai tanár, CSc
Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet
Budapest

....
Az iskolavezető jóváhagyása A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉS- ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK 5
1. BEVEZETÉS 9
1.1. A kutatómunka jelentősége 9
1.2. A kutatómunka célkitűzései 10
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS 13
2.1. A felület minősége 13
2.2. A felületi mikroegyenetlenségek mérési módszerei és eszközei 15
2.2.1. Topografikus érdességmérő berendezés 16
2.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) 21
2.3. Síkbeli (2D-s) mikrogeometriai jellemzők 23
2.3.1. A felületi mikrogeometria magassági jellemzői 26
2.3.2. A felületi mikrogeometria profil irányú paraméterei 30
2.3.3. A felületi mikrogeometria formai paraméterei 30
2.4. A felület térbeli (3D-s) mikrotopográfiai jellezői 32
2.4.1. Az egyenetlenség magasságirányú (amplitúdó) jellemzői 33
2.4.2. Az egyenetlenség vízszintes irányú (térközi) jellemzői 36
2.4.3. Az egyenetlenség összetett geometriai (hibrid) jellemzői 38
2.4.4. Funkcionális (működési tulajdonságokat leíró) jellemzők 39
2.5. A forgácsolt felület minőségének kialakulására ható tényezők 41
2.6. Az érdesség meghatározása egyélű szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett esztergálásnál 45
2.7. A szakirodalom összefoglalása, kritikai elemzése 48
3. ANYAG ÉS MÓDSZER 51
3.1. Műszaki műanyagok 51
3.2. Műszaki műanyagok megmunkálása forgácsolással 54
3.3. A kutatásban alkalmazott műszaki műanyagok forgácsolási paraméterei 56
3.4. A kísérletek helyszínei, gépek és eszközök 59
3.4.1. A forgácsolási kísérletnél alkalmazott szerszámgép 59
3.4.2. A felületi érdesség mérésének körülményei 60
3.5. A kísérletek során alkalmazott anyagok 62
3.6. A forgácsolási kísérletek 63
3.6.1. Az esztergálás választott paraméterei 63
3.6.2. Az alkalmazott szerszámok 64
4. EREDMÉNYEK 67

4.1. Az elméleti érdesség vizsgálata esztergált műszaki műanyagoknál 67
4.1.1. Az elméleti érdesség vizsgálata öntött poliamid 6 esetén 67
4.1.2. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(oxi-metilén) esetén 69
4.1.3. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(etilén-tereftalát) esetén 72
4.1.4. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(éter-éterketon) esetén 73
4.2. Faktoriális kísérletterv a forgácsolási paraméterek hatásának vizsgálata a felületi érdesség magasságirányú jellemzőire 76
4.2.1. Vizsgálat eredménye öntött poliamid 6 műszaki műanyagnál 76
4.2.2. Vizsgálat eredménye poli(etilén-tereftalát) műszaki műanyagnál 79
4.2.3. Vizsgálat eredménye poli(oxi-metilén) műszaki műanyagnál 80
4.2.4. Vizsgálat eredménye poli(éter-éterketon) műszaki műanyagnál 81
4.3. Növelt csúcssugarú szerszámmal végzett forgácsolási kísérlet eredényei 82
4.3.1. Eredmények kiértékelése öntött poliamid 6 esetén 83
4.3.2. Eredmények kiértékelése poli(etilén-tereftalát) esetén 83
4.3.3. Eredmények kiértékelése poli(oxi-metilén) esetén 84
4.3.4. Eredmények kiértékelése poli(éter-éterketon) esetén 85
4.4. Az átlagos érdesség és a műszaki műanyagok mechanikai jellemzőinek kapcsolata 89
4.5. Új tudományos eredmények 92
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK 95
6. ÖSSZEFOGLALÁS 97
SUMMARY 98
MELLÉKLETEK 99
M1. Irodalomjegyzék 100
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk 109
M3. Mahr Perthen Concept mérőberendezés mérési lapja 110
M4. Az átlagos érdesség a forgácsolási sebesség függvényében azonos előtolásokkal és fogásmélységgel PA 6, POM C, PET, PEEK műszaki műanyagok esetén 111
M5. A forgács alakulása a VCGX 110204-AL/H10 lapkával forgácsolva 112
M6. A forgács alakulása a DCGX 11T304-AL/H10 lapkával forgácsolva 114
M7. A forgács alakulása a VCGX 11T308-AL/H10 lapkával forgácsolva 116
M8. A várható érdesség alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál 117
M9. PEEK esztergált felületének SEM képe és topográfiája 119
M10. Az átlagos érdesség alakulása a mechanikai jellemzők függvényében műszaki műanyagoknál 120
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS 138

JELÖLÉS- ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Jel	Megnevezés, mértékegység
2D	síkbeli, kétdimenziós
3D	térbeli, három dimenziós
a	fogásmélység, mm
A	szakadási nyúlás, %
A(h)	*h* metszési magasságnál számított hordozófelület
AACF	térbeli autókorrelációs függvény (areal autocorrelation function)
ADK	relatív hordozóhossz görbe
AFM	Atomic Force Microscope, atomerő mikroszkópia
APSD	felület energiaspektrum sűrűség (areal power spectral density)
C_R	faktoriális kísérlettervben a modell együtthatója
d_{md}	munkadarab átmérője, mm
E	rugalmassági modulus, N/mm^2
f	előtolás, mm/ford
h	forgácsvastagság, mm
h_{min}	leválasztható minimális forgácsvastagság, mm
HB	Brinnel-keménység, MPa
Kp	profil űrtényező
l_c	előírt szűrő, mm
LFM	Laser Force Microscope, lézererő mikroszkópia
l_m	kiértékelési hossz, mm
l_{md}	munkadarab hossza, mm
ln	profil vizsgált hossza, mm
l_t	tapintási hossz, mm
l_v	előfutási hossz, mm
M	x tengely irányában vett mérési pontok száma
MFM	Magnetic Force Microscope, mágneses erő mikroszkópai
Ml(c)	hordozóhossz, mm
N	y tengely irányában vett mérési pontok száma
P	nem szűrt profil
PA	Poliamid
PA6	öntött poliamid 6
Pc	Csúcsszám
PEEK	poli(éter-éterketon)
PET	poli(etilén-tereftalát)
PI	Poliimid
POM	Poliacetál
POMC	poli(oxi-metilén) kopolimer
PPS	Polifenilszulfid
PVDF	Polivinildénfluorid

R	érdesség
R^2	korrelációt mutató determinációs együttható
Ra	átlagos érdesség, µm
Rc	profilelemek közepes magassága, µm
Re	elméleti érdesség Bauer-formula szerint, µm
Re_{Br}	Brammertz-féle elméleti érdesség, µm
Rku	lapultsági mérőszám, µm
R_m	mechanikai szilárdság, MPa
Rmax	maximális egyenetlenség, µm
Rmr	hordozóhossz arány, µm
r_n	szerszám éllekerekedése, µm
Rp	profil maximális csúcsmagassága, µm
Rq	profil közepes mértani eltérése, µm
Rsk	ferdeségi mérőszám, µm
Rsm	egyenetlenségek közepes hullámhossza, µm
Rt	teljes profilmélység, maximális egyenetlenség, µm
Rv	profil maximális völgymélysége, µm
Rz	egyenetlenség magasság, µm
RzDIN	közepes érdességmélység, µm
RΔq	profil hajlásának négyzetes középértéke, µm
r_ε	szerszám csúcssugara, mm
s	szórás
Sa	átlagos egyenetlenség (arithmetical mean height), µm
Sal	leggyorsabb csillapodású autókorrelációs hossz (the fastest decay autocorrelation lenght), µm
Sbi	hordozófelületi jelzőszám (surface bearing index)
Sci	magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma (core fluid retention index)
Sdr	felületarány (developed interfacial area ratio)
SEM	Scanning Electron Microscope, pásztázó elektronmikroszkópia
SICM	Scanning Ion Conductance Microscope, pásztázó ionvezetőképesség mikroszkópia
Sku	felületi topográfia magasságeloszlásának hegyessége (kurtosos of topography height distribution)
s_l	lapka vastagsága, mm
Sm	barázdatávolság, (mm)
Sp	maximális csúcsmagasság (maximum peak height), µm
Sq	az eltérések mértani átlaga (root mean square value of the scale limited surface), µm
Ssc	felületi csúcsok görbületének számtani középértéke (aritmetic mean summit curvature of the surface)
Ssk	felületi topográfia magasságeloszlásának ferdesége (skewness of the scale limited surface)

Std	felület textúrairánya (texture direction of the surface)
STM	Scanning Tunelling Microscope, pásztázó alagútmikroszkópia
Stp	hordozófelületi arány (surface bearing area ratio)
Str	textúrahelyzet viszonyszám (texture aspect ratio of the surface)
Sv	maximális völgymélység (maximum pit height), μm
Svi	völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma (valley fluid retention index)
SΔq	felületi mikrogeometria hajlásának geometriai középértéke (root mean square slope of the surface)
Sz	maximális magasság (maximum height of scale limited surface), μm
t_c	forgácsolási idő, min
TEM	Transmission Electron Microscope, transzmissziós elektronmikroszkópai
TPK	hordozóhossz görbe
UHMW-PE	ultranagy molekulatömegű polietilén
v_c	forgácsoló sebesség, m/min
Vmc	a magzóna anyagtérfogat hányada
Vmp	a csúcszóna anyagtérfogat hányada
Vmv	a völgyzóna anyagtérfogat hányada
Vvc	a magzóna ürestérfogat hányada
Vvp	a csúcszóna ürestérfogat hányada
Vvv	a völgyzóna ürestérfogat hányada
W	hullámosság
Zi	távolságok, μm
α_0	hátszög, °
γ	homlokszög, °
ε_r	csúcsszög, °
$\eta(x_i,y_j)$	letapogatott felület j-edik sor, i-edik pontjának az illeszkedő felülettől mért merőleges távolsága, μm
κ_r	főélelhelyezési szög, °
$\lambda c, \lambda f, \lambda s$	határhullámhossz, mm
λ_s	terelőszög, °
μ	súrlódási tényező
σ	folyási feszültség, N/mm^2

1. BEVEZETÉS

1.1. A kutatómunka jelentősége

A felület minőségét számos tényező befolyásolja, melyek megközelíthetők a gyártás és a felhasználás oldaláról. A megmunkálás során kialakult felület azonban hatással van a gépelemek működési tulajdonságaira, tribológiai viselkedésére. A felületi minőség jellemzésére érdességi mérőszámokat alkalmaznak a műszaki gyakorlatban, melyek lehetnek kétdimenziós, ún. mikrogeometriai paraméterek és háromdimenziós, ún. mikrotopográfiai jellemzők. A felületi mikrogeometria mérése és jellemzése többnyire szabványosított, így alkalmas az egyes felülettípusok összehasonlításra. Széles paraméterkészlet áll rendelkezésre a felületi textúra jellemzésére, az ipari gyakorlat mégis 2-3 mérőszámot alkalmaz. A számítástechnika fejlődése lehetővé tette nagymennyiségű adat viszonylag rövid idejű feldolgozását, s így a 3D-s felületértékelés bevezetését is. A tudományos élet kitüntetett érdeklődését a felületi topográfia iránt az okozza, hogy a felület lényegesen valósághűbb jellemzését teszi lehetővé. A háromdimenziós kiértékeléstechnika alapkövét Stout és társai tették le, amikor kiadványukban értelmezték a 3D-s felületi érdességet és definiálták a 3D-s mérőszámokat is (STOUT et al. 1993).

A műszaki tudományok területén napjainkban különösen nagy figyelmet fordítanak a különböző műanyagok fejlesztésére. A műanyagok egy évszázados történelme alatt olyan nagymértékű fejlesztési lépések történtek, hogy ma már nem pótanyagoknak, hanem igen fontos szerkezeti anyagoknak számítanak az ipar szinte minden területén. Tulajdonságaikban gyakran felülmúlják a hagyományos anyagokat, összetételük megváltoztatásával (pl. lágyítóanyag hozzáadásával, szálerősítéssel) konkrét felhasználási területre alakíthatók. A kisebb sűrűség, a nagy szilárdság, a korrózióállóság, vegyszerállóság, a villamos szigetelő képesség előnyként jelentkezik a fémekhez viszonyítva, de hátrányos tulajdonságaikat, mint a kis hőállóság, esetenként a magas nedvességfelvétel is figyelembe kell venni felhasználásuk során. „A műszaki műanyagok olyan polimerek, amelyek széles hőmérséklet tartományban kitűnő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek” (ANTAL et al. 1997). Ezen műanyagokat több formában állítják elő, amelyek alapvetően a további feldolgozási módoktól függnek. Lehetnek por vagy granulátum termékek, félkész termékek (rudak, csövek, táblák stb.) illetve késztermékek. A műszaki műanyagok egyik jelentős csoportja az általános rendeltetésű műszaki műanyagok, melyek közül a dolgozatban az öntött poliamid 6, a poli(oximetilén) ko-polimer, és a poli(etilén-tereftalát) anyagokon végeztem forgácsolási kísérleteket. A nagyteljesítményű műszaki műanyagok közül a poli(éter-éterketon) anyagot választottam, mivel magas hőállóság, nagy szilárdság, nagy méretstabilitás és merevség jellemzi, felhasználása rendkívül széleskörű, mint például: a repüléstechnika, járműtechnika, vegyi és villamos ipar, stb.

A forgácsoló eljárás, ezen belül az esztergálás alkalmazása a műanyagok megmunkálásánál mára nagy jelentőségű és főleg a javítótechnológiában egyeduralkodó. Ennek ellenére az egyes anyagtípusokra jellemző forgácsolási paramétereket a szakirodalom igen tág határok között adja meg, amely elsősorban a hőmérséklet okozta deformáció, esetleges lágyulás elkerülésére irányulnak illetve a gazdaságos előállítás biztosítását szolgálják a műszaki gyakorlatban. A forgácsolt műszaki műanyagok elterjedése a szerszámgyártókat is rákényszerítette a műanyagok megmunkálására alkalmas szerszámok fejlesztésére.

1.2. A kutatómunka célkitűzései

A forgácsolási folyamatban a megmunkálás körülményeit és adatait úgy kell megválasztani, hogy a megmunkált munkadarab megfeleljen a tervező által megadott méretpontosságnak, alakhűségnek, valamint felületi minőségnek. Számos kutató foglalkozott a fémek forgácsolással történő megmunkálásával, illetve az adott eljárásra jellemző tényezőknek (esztergálás esetén például az előtolás, csúcssugár, forgácsolási idő, forgácsolási sebesség, élgeometria stb.) a felület érdességére gyakorolt hatásának vizsgálatával (PALÁSTI et al. 2002 (a), VARGA 2006).

A kutatómunkám elsődleges célja az esztergálással előállított műszaki műanyag felületek érdességi paramétereinek kiértékelése és elemzése. További fontos feladat a műanyag alkatrészek megmunkálásakor létrehozott felületek elvárt működési viselkedésének megfelelő felülettervezési követelmények kidolgozása. A célok meghatározásánál a legfontosabb szempont az volt, hogy a kísérletek eredményei a műszaki gyakorlat számára is hasznosak legyenek. A műszaki műanyagok forgácsoló megmunkálásakor a felületi mikrogeometria és a technológiai adatok összefüggései ma még nem kellően feltártak. A vizsgálatok anyagaként a műszaki műanyagok közül néhány olyan hőre lágyuló típust választottam ki, amelyek a gépészeti alkalmazásban meghatározó szerepet töltenek be.

- Geometriailag határozott szerszámél (különböző lapkageometriák, tecnológiai paraméterek) és a megmunkált felület kölcsönhatásának vizsgálata. A kísérletek első két fázisában az alkalmazott esztergálási paraméterek: a forgácsoló sebesség: v_c = 200; 250; 315; 400 m/min, az előtolás a nagyolási fázisban: f = 0,2; 0,25; 0,315; 0,4 mm/ford, az előtolás a simítási fázisban: f = 0,05; 0,08; 0,12; 0,16 mm, a fogásmélység: a = 0,5 mm (állandó értéken tartva). A kísérletek harmadik fázisában forgácsoló sebesség: v_c = 400 m/min (állandó értéken tartva), az előtolás: f = 0,08; 0,125; 0,2; 0,315 mm/ford, a fogásmélység: a = 1,0 mm és a = 2,0 mm.
- Elektronmikroszkópikus (SEM) úton nyert felületképek jellemzőinek és információtartalmának vizsgálata PEEK műszaki műanyag esetén.

- Függvénykapcsolatok feltárása, a legfontosabb befolyásoló tényezők hatását is figyelembe vevő empirikus összefüggésekkel. Kísérlettervezési módszerrel az $R = C_R \cdot v_c^{x_1} \cdot f^{x_2}$ függvénykapcsolatot vizsgálom, melyben a választott paraméterek az *Ra* (átlagos érdesség) és az *Rz* (egyenetlenség magasság), a kijelölt faktorok a forgácsoló sebesség (v_c) és az előtolás (f).

A fentiekben vázolt témákhoz szerteágazó szakirodalom tartozik, ezért a szakirodalmi áttekintést a dolgozat témái szempontjából legfontosabbakra korlátoztam, és a következő fejezetben ezeket ismertetem.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A felület minősége

A felület minőségét befolyásoló tényezők vizsgálhatók a gyártás és a működés oldaláról egyaránt. Jellegzetes hatások, melyek a felületi mikrotopográfiát a megmunkálás során befolyásolják (FARKAS et al. 2005 (b)):

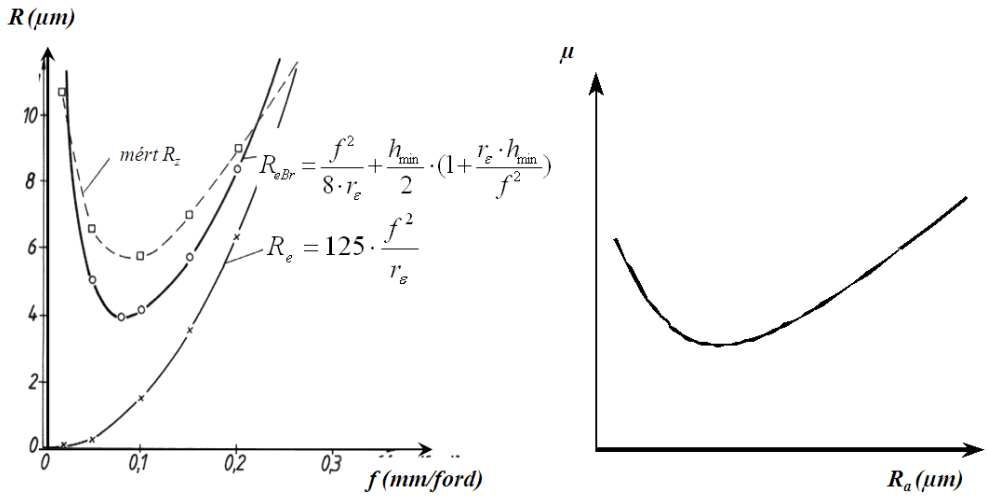
- munkadarab megfogásának hibái, a szerszámgép helytelen beállítása,
- szerszámgép-munkadarab és a szerszám-munkadarab kölcsönhatása,
- gép és szerszám rugalmassága,
- gépen jelentkező összes külső és belső rezgésforrásból származó elmozdulás,
- szerszám geometriája (élszöge, csúcssugara, élérdessége),
- forgácsolási paraméterek (fogásmélység, előtolás, forgácsolási sebesség),
- a forgácsolás során létrejövő hibák (élrátét, szerszámkopás),
- a forgácsolt anyag minősége (szemcseméret, keménység, szívósság).

A megmunkáláskor létrejövő "kiinduló" felület minősége befolyásolja a gépalkatrészek későbbi működési viselkedését, élettartamát. A működés során a felületi minőség folyamatosan változik, módosul (CZIFRA et al. 2005). Ekkor az alábbi hatások befolyásolják a kapcsolódó felületek mikrotopográfiáját, s azon keresztül a tribológiai viselkedést is (PALÁSTI et al. 2007):

- két felület egymáson való elmozdulása során, a terhelés hatására az érdességcsúcsok deformálódnak és az ellenfelületen rugalmas vagy képlékeny alakítást hoznak létre;
- a kapcsolódó alkatrészpár felületi egyenetlenségei – érdességcsúcsai – a keménységkülönbség miatt belehatolnak a másik anyagba, és ebből pusztán mechanikai úton anyagrészeket választanak le;
- az elmozduló felületeken meglévő, vagy az előbbi jelenségek hatására létrejövő feltapadt, illetve leszakadt részecskék "mini-forgácsok" kisebb-nagyobb karcnyomokat hagynak,
- a fenti folyamatot befolyásoló geometriai tényezők között szerepelnek a megmunkálási nyomok, az alakhibák, a hullámosság és az érdesség, valamint a szubmikro-érdesség is.

A gyakorlatban alkalmaznak bizonyos összefüggéseket, melyek kapcsolatot teremtenek a forgácsolási paraméterek és a felületi érdesség között (2.1. ábra), ám közel sem nevezhetők általánosnak és átfogónak. Az ábrából is kiderül, hogy az

egyszerű elméleti (geometrián alapuló) képlet a kisebb előtolási tartományban megengedhetetlenül nagy hibával írja le a várható érdességet, s a tervezési gyakorlat mégis széles körben használja. Ezt a kísérleti vizsgálatok eredményeivel korrigálni kell és ismertté is kell tenni (PALÁSTI 1983).



a) b)

2.1. ábra a) Az elméleti és a valóságos érdesség szabályos élgeometriájú esztergálásnál, b) a súrlódási tényező (μ) és az érdesség (*Ra*) kapcsolata (PALÁSTI 1983, ANGYAL 1988)

A felületi minőség és a tribológiai jelenségek kapcsolata a működés oldaláról talán még szorosabb, mint a gyártás során - ahol anyagleválasztásról, alakításról van szó. A működés során adottak a felületek, s azok minőségének megváltozása a felületek kapcsolódásának, az ott bekövetkező tribológiai folyamatoknak a következménye (PALÁSTI et al. 2002 (b)). Mind a súrlódási, mind a kopási folyamatok esetében számos munkát találunk, mely a felületi érdesség hatását tanulmányozza (ELEŐD 1998, BLAU 2001, KALÁCSKA et al. 2006 (b)). A felület minőségét komplex fogalomként kell értelmezni, amely magába foglalja:

- a felületi mikrogeometria eltéréseit, ezen belül az érdességet és a hullámosságot;
- a felületi réteg fizikai, kémiai állapotát, így a megmunkálás során létrejövő képlékeny alakváltozást, a felületi réteg keménységét, a maradó feszültséget, a szövetszerkezetet, és a vegyi összetételt (THOMAS 1998).

2.2. A felületi mikroegyenetlenségek mérési módszerei és eszközei

A felületi egyenetlenségek jellemzésére számos mérési eljárás ismert, amelyek a felületet különböző szempontból vizsgálják, és eltérő információkat szolgáltatnak. HORVÁTH (2008) munkájában összefoglalta a felületvizsgálati módszereket. Három jellegzetes méréstechnikát különbözet meg, melyeken belül két típusra osztja, mint számszerűsíthető eredményeket adó és képi megjelenítésre alkalmas eljárások:

- Tapintófejes mérés:
    - Számszerűsíthető eredményeket szolgáltatnak:
        - Mechanikus elven működő berendezések
        - Elektronikus berendezések
    - Képi megjelenítésre alkalmas:
        - Mért felület képi megjelenítése
- Optikai mérések
    - Számszerűsíthető eredményeket szolgáltatnak:
        - Visszatükröződésen alapuló (Specular reflectance)
        - Teljes integrált szórás (Total integrated scatter)
        - Irányeloszlás (Angular distribution)
        - Közvetlen Fourier-transzformáció
        - Ellipszometria
    - Képi megjelenítésre alkalmas:
        - Optikai metszetek (Optical sections)
        - Optikai tapintók (Optical probes)
        - Interferométerek
- Egyéb műszaki megoldások
    - Számszerűsíthető eredményeket szolgáltatnak:
        - Mechanikus eljárások (pl. SICM, LFM, MFM stb.)
        - Elektronikai eljárások (kapacitív alapú berendezések, nagyfrekvenciás váltóáramú berendezések)
        - Fluid módszerek
        - Akusztikus módszerek

- Képi megjelenítésre alkalmas eljárások:
  - Vékony metszetek (Taper Sectioning)
  - Elektronmikroszkópia (TEM)
  - Pásztázó mikroszkópok (pl. SEM, STM, AFM)

Jellegzetes mérési módszerek az összehasonlító etalonok, a metszettapintós eljárás, valamint az optikai eszközzel (pl.: elektronmikroszkópia) készült felvételek. Lézeres felületvizsgáló berendezéseket is alkalmaznak különösen azokra a felülettípusokra, ahol a tapintótű a felület deformációját okozná (KIM et al. 2002). A műszaki gyakorlatban központi szerepet játszik a tapintótűs méréstechnika, ahol a felületi egyenetlenség érzékelésére egy megfelelően kialakított tapintótűt alkalmaznak (JENSEN et al. 2001).

A felületi érdesség vizsgálatára, illetve megállapítására alapvetően kétféle módszer létezik (SZILÁGYI 1977, HARMATH et al. 1994):

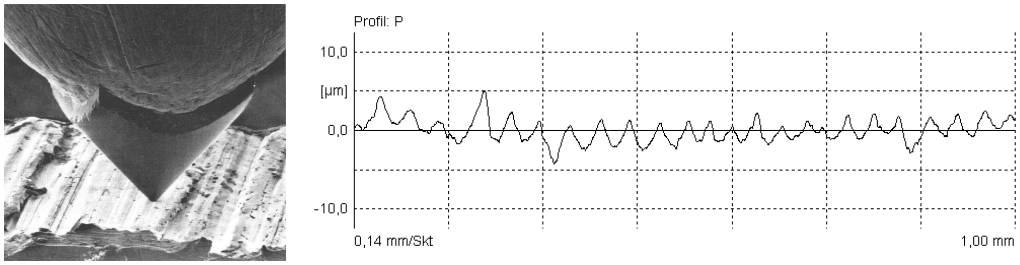
- a szubjektív és
- az objektív módszer.

Ma alapvetően az objektív módszer a használatos, azon belül is elsősorban a profilvizsgáló mérőgépek, melyek képesek a felületi minőség jellemzésére alkalmazott jellemzőket is szolgáltatni, továbbá számítógépes adatfeldolgozásra is alkalmasak. A szubjektív összehasonlítás során a vizsgált felületet szabad szemmel, tapintással, vagy mikroszkóp segítségével hasonlítjuk össze egy etalon felületével. Ez a módszer a szubjektivitása miatt csak alárendelt szerepű. Az összehasonlítás során arra kellett ügyelni, hogy az érdességi etalon megmunkálási módja megegyezzen a vizsgált felületével.
Működés szempontjából megkülönböztethetők:

- a finommechanikai,
- az optikai,
- a villamos és
- a pneumatikus érdesség mérő műszerek.

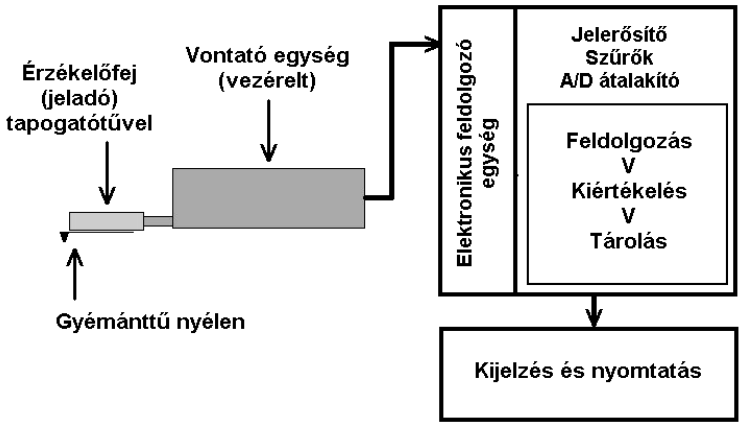
2.2.1. Topografikus érdességmérő berendezés

A műszaki gyakorlatban központi szerepet játszik a tapintótűs méréstechnika. Ennél az eljárásnál a megfelelően kialakított tapintó végigcsúszik a felületen, és a mozgásából keletkező jel az átalakítóban elektromos jellé alakul (2.2. ábra).



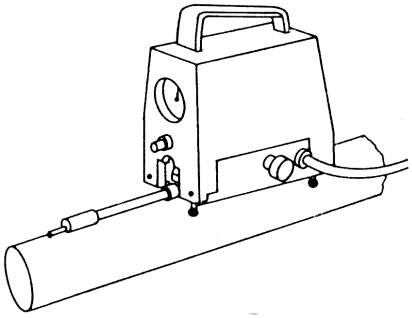
2.2. ábra Tapintótűs méréstechnika és a 2D-s profilkép (FARKAS et al. 2005 (b))

A profilometriás felületi érdesség-mérőgépek (profilletapogatás útján dolgozó) esetében az igen kis (µm nagyságrendű) lekerekítési sugárral rendelkező gyémántcsúcs egyenletes sebességgel haladés így tapogatja le a felület egyenetlenségeit.
A gyémántcsúcs függőleges mozgása egy induktív mérőfej (2.3. ábra) horgonyára adódik át, amelynek tekercsrendszere a jelátalakító elektronikához kapcsolódik. A kalibrált mérőerősítő kimenetén megjelenő mérőjel pillanatnyi értéke jó közelítéssel arányos a mérőcsúcs pillanatnyi elmozdulásával.

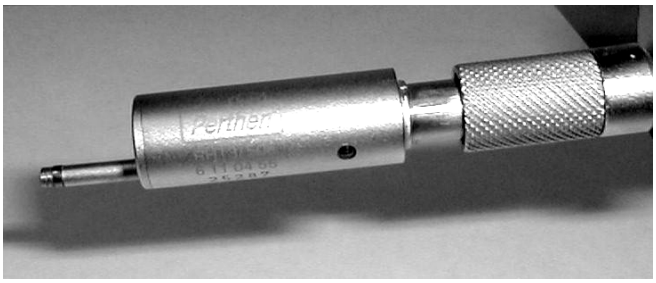


2.3. ábra Profilometriás érdességmérés elve (MAHR 1998)

A mérőfej vontatóegysége vagy a munkadarabra ráhelyezhető (2.4. ábra) (hordozható kivitel), vagy egy oszlop mentén magassági irányban, a szükséges magasságban állítható. A legmodernebb mérőfejekben nem induktív mérőjel-átalakítót, hanem annál lényegesen pontosabb (és elvileg tökéletesen lineáris) lézer-interferométert alkalmaznak. Léteznek hibrid megoldások is.



a)



b)

2.4. ábra a) Induktív mérőfej b) Darabra ültethető készülék (MAHR 1998)

A mérőtapintók mechanikai kivitele igen változatos. A gyártók több mérőfejet (egész sorozatot is) kínálnak egy érdességmérőhöz, ezekkel a legkülönbözőbb felületek mérése oldható meg. A konkrét feladathoz legmegfelelőbb tapintó kiválasztása a mérést végző személytől nagy tapasztalatot és elméleti ismereteket követel meg. A mérőjel, melynek amplitúdó lefutása gyakorlatilag a letapogatott profilnak megfelel, speciális szűrőegységre kerül, majd a mérőfej elmozdulását mérő útmérő jeleiből előállított impulzusokkal mintavételezve a szűrt jelet, azt digitális jelsorozattá alakítja. A számítógép az így nyert, a memóriájában tárolt, a felület jellemzőit hordozó adathalmazból határozza meg a felület jellemzőit több-kevesebb sikerrel leíró mérőszámokat (digitális szűrés, Fourier-analízis, különböző statisztikai módszerek). A célszerűen megválasztott nagyítással felvett profildiagramok jól tükrözik a felület jellegét, s kellő tapasztalat és gyakorlat birtokában sok lényeges információ forrásai lehetnek. A korszerű metszettapintó műszerek lehetővé teszik az érdességi és hullámossági profilok, valamint a szűrés nélküli, torzítatlan profilképek felrajzolását. Az így felvett profildiagramok szinte nélkülözhetetlenek az átfogó mikrogeometriai értékelés megadásához. Az értékeléskor azonban azt is figyelembe kell venni, hogy a függőleges és a vízszintes nagyítások jelentős különbsége miatt az ábrázolás torzított. A tapintótűk többnyire kúp, vagy gúla alakúak néhány mm-es csúcssugarú legömbölyített véggel. A műszer lelke a jel-átalakító. Kezdetben használtak piezoelektromos kristályokat is, de mára már szinte kizárólag az elektromágneses elven működő lineáris működésű differenciáltranszformátort alkalmazzák. A kijövő jelet felerősítik, majd számítógépes feldolgozás következik.

Mint minden méréstechnikának, ennek is megvannak a maga hibaforrásai, melyek ismerete szükséges ahhoz, hogy a műszeren kapott eredményeket megfelelően tudjuk kiértékelni:

- a tapintófej csúcsának lekerekítése,
- az alkalmazott terhelőerő,
- a tapintótű csúszása.

A tapintófej csúcsának lekerekítése

A tapintócsúcs lekerekítési sugara adott. Ez a korszerű berendezéseken eléri az 1 μm-t. Azonban ez a kis sugár is azt jelenti, hogy a tapintótű képtelen az ennél kisebb nyílásokba, hézagokba, hibákat észlelni, tehát elsiklik felettük. Így a kapott felület nem tökéletesen egyezik az eredetivel. Ez a hiba elhanyagolható, ha a felületi textúra egyenetlenségei lényegesen nagyobbak a tapintótű csúcslekerekítésénél, azonban számottevő lehet, ha igen finom felülethez nagy csúcslekerekítésű tapintót használunk. Ez olyan mértékben elsimíthatja a felületet, hogy az eredményünk gyakorlati szempontból értékelhetetlen.

Az alkalmazott terhelő erő

Azoknál a tapintóknál, melyek mereven kapcsolódnak a mozgatószerkezethez előfordulhat az a hiba - főként lágy felületek esetében, hogy a tapintótű alatt megfolyik az anyag. A kis felületen alkalmazott kis terhelés is nagy felületi nyomást eredményezhet. Azokat a tapintókat, melyek szabadon mozoghatnak csak az önsúly terheli, ez pedig nem eredményezhet hasonló hatást.

A tapintótű csúszása

Hibaként léphet fel a tapintótű esetleges lecsúszása a vizsgált felületről. Ez alatt azt kell érteni, hogy a nem tökéletesen merev tapintó a nagy kiemelkedésekről, a meredek élekről lecsúszik, és nem tökéletesen egyenes nyomvonalon jár, hanem eltér attól. Így a legmagasabb mért csúcsok kisebb méretűek lesznek, mint a valóságban.

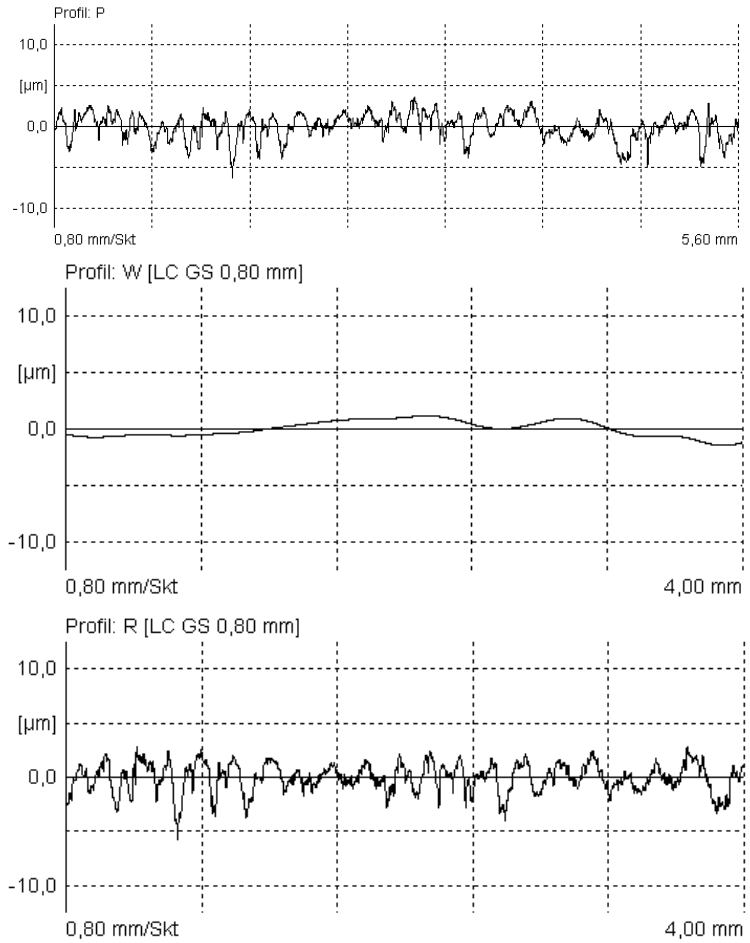
Az említett hibák mind mechanikai jellegűek, és csak a letapogatás bizonytalanságaira utalnak. Természetesen vannak a mozgató-berendezésnek is hibái, holtjátékai. Ezeket egyrészt a műszert gyártó cégek igyekszenek minimálisra csökkenteni, másrészt a kiértékelő programok legtöbbször figyelembe veszik az ilyen hibákat. Ugyanez áll az elektronikus alkatrészekre is, bár ezek hibája lényegesen kisebb, mint a mechanikus részegységeké.

A szűrők szerepe

A szűrők is fontos szerepet játszanak a felületi topográfia kiértékelésében. A felületi egyenetlenségek sokféle hullámhosszúságú, többé-kevésbé periódikusan ismétlődő struktúrából tevődnek össze. A felület nagyon bonyolult módon írható le, jellemzői nehezen és sokszor nem túl egyértelműen adhatók meg. Két jellemző összetevő általában könnyen megkülönböztethető: az amplitúdóhoz képest nagy hullámhosszúságú hullámosság és a nagyságrendekkel kisebb hullámhosszúságú érdesség. Ezek szétválasztása a szűrők feladata.

A 2.5. ábrán a felső diagram a szűrés nélküli profil (amennyiben a tapintócsúcs sugarának szűrő hatásától eltekintünk), a középső a hullámosságot (alul áteresztő

szűrővel), az alsó a hullámosságtól különválasztott érdességet (felül áteresztő szűrővel) mutatja.



2.5. ábra Szűrés nélküli profil, hullámossági profil, szűrt érdességi profil (MAHR 1998)

A hagyományosnak tekinthető metszettapintós (kétdimenziós) érdességméréseknél igazolást nyert, hogy a mérés eredményét számos tényező befolyásolja. A legfontosabbak ezek közül:

- a kiértékelési hossz,
- a mintavételi távolság értéke,
- a középvonal helyzete,
- a tapintó csúcssugarának nagysága,
- a mérőerő,
- a vontatási sebesség, stb.

Háromdimenziós méréseknél e befolyásoló tényezők elsősorban a térbeliség feltételei szerint, részint újabbakkal kiegészülve módosulnak. Az egyes paraméterek gyakorlati alkalmazhatóságának megítélése szempontjából fontos a mérési folyamat két alapvető jellemzőjének – a mintavételi távolságnak és a mintavételi felületnek – megváltozására való érzékenység ismerete. Szerzőtársaimmal kísérletet végeztünk három – közel hasonló *Sa*-val rendelkező – eltérő megmunkálási eljárással előállított, alapvetően eltérő topográfiai jelleggel bíró felületet esetében (FARKAS et al. 2005 (b)). Az eredmények értékelésekor megállapítottuk, hogy a mérési folyamat két alapvető jellemzőjének – mintavételi távolság és a mintavételi felület – változására számos mikrotopográfiai paraméter érzékeny. A felület izotróp illetve anizotróp jellege is szerepet játszik a paraméterek érzékenységében. A mérési paraméterek nem megfelelő megválasztásakor tehát információvesztés lép fel. Ezért fontos és szükséges a mérési gyakorlat, a mérés körülményeinek beállítási, szabványosítási előírásainak felülvizsgálata elsősorban a 3D-s topográfiai mérési és kiértékelési eljárás tekintetében (FARKAS et al. 2005 (c)).

2.2.2. Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)

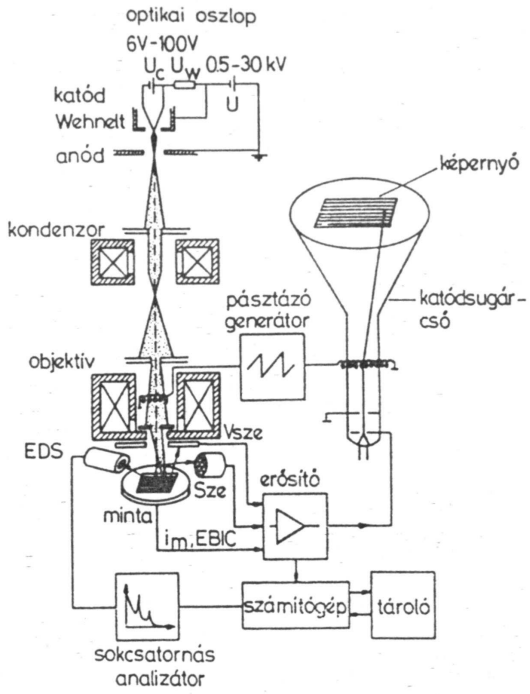
A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM, Scanning Electron Microscope) az egyik leghatékonyabb eszköz a felületek jellegzetességeinek képi megismerésében. A nagyítási tartománya széles (~10x néhány 100.000x) mind a gyártásban kialakuló felületi mikroszerkezet jellegzetességeinek feltárását, mind pedig a valós felületek működés közbeni megváltozásának nyomon követését lehetővé teszi. A pásztázó elektronmikroszkópban a minta felületét vizsgáljuk (KÁLMÁN et al. 2003). A vizsgálataim során az Anyag- és Alakítástechnológia Tanszékre 1996-ban beszerzett JEOL JSM-5310 típusú pásztázó elektronmikroszkóp berendezését használtam, amely 200.000-szeres nagyításra is képes.

A SEM a mintából az elektronsugarak hatására kiváltott szekunder elektronokat rögzíti a képernyőn. A szekunder elektronok a minta felszínének geometriai egyenetlenségeiről hordoznak információkat, a minta vékony felületi rétegéből származnak (≤ 200 nm), jelenleg velük készíthetjük a SEM-ben a legnagyobb laterális felbontású képeket. (CSANÁDY et al. 2004)

A felületek integritásának, jellegzetességeinek képi megismerésében sok segítséget adhat a scanning elektronmikroszkóp, amely mind a gyártásban kialakuló felületi mikroszerkezet jellegzetességeinek feltárását, mind pedig a valós felületek működés közbeni megváltozásának (barázdaképződés: mikro-forgács leválása és „elporladása") nyomon követését teszi lehetővé. (BOLLÓK et al. 2006)

A SEM által készített képi felvételek kiegészíthetők háromdimenziós topografikus mérésekkel, amelyekből még több információ állapítható meg, pl. a barázdát jellemző méretekből következtetni lehet az ott lezajló képlékeny alakváltozási folyamatra, valamint a barázdák hosszából egy-egy mikroforgács, illetve részecske

"élettartamára". A pásztázó elektronmikroszkóp adta vizuális képi lehetőségek tehát olyan alapvető információkat szolgáltathatnak, amelyek jelentősen segítik a kopási folyamatok feltárásával foglalkozó kutatásokat is.



2.6. ábra. Az elektronmikroszkóp vázlatos felépítése (POZSGAI 1994)

Működése azon alapszik, hogy egy jól fókuszált elektronnyalábbal végigpásztázzuk a vákuumban lévő minta felületét és a mintából származó jelekkel (szekunder elektronok, visszaszórt elektronok, röntgensugárzás) leképezzük a minta felszínét oly módon, hogy a mikroszkóp elektronnyalábjával szinkron működő katódsugárcső fényintenzitását a mintáról kapott jellel moduláljuk. A pásztázó elektronmikroszkóp vázlatos felépítése az 2.6. ábrán látható. (POZSGAI 1994)
A felületi mikrotopográfia témakörében az elektronmikroszkóppal kapott eredmények nem számszerűsíthetők, így az eszközt „csupán csak" a vizsgált felület megtekintésére használjuk, ami persze sok esetben rengeteg információt nyújt a felületről, és igen gyakran magyarázattal szolgál az egyébként nem érzékelhető mikrotopográfiai tényekre, jelenségekre. A jelenkori mikroszkópokkal azonos elven működő első pásztázó elektronmikroszkóp, amellyel tömbanyagot lehetett szekunder elektronokkal leképezni 1942-ben készült el. Az első pásztázó elektronmikroszkóp a kereskedelmi forgalomban 1965-ben jelent meg. Népszerűségét elsősorban nagy mélységérzékelése jelentette (2.1. táblázat). Olyan plasztikus képek nyerhetők a pásztázó elektronmikroszkóppal, amelyekhez

hasonlót sem fénymikroszkóppal, sem transzmissziós elektronmikroszkóppal nem lehet előállítani

2.1. táblázat Fénymikroszkóp és a pásztázó elektronmikroszkóp összehasonlítása (POZSGAI 1994)

	Fénymikroszkóp	**Pásztázó elektronmikroszkóp**
Mélységélessége	1-10 μm	3-4 mm
Felbontóképessége	100-200 nm	Átlag 5 nm

A pásztázó elektronmikroszkóp nagy előnye abban is rejlik, hogy ha kellőképpen fel van szerelve, akkor a nagy nagyítású képek előállításán kívül számos olyan fizikai mérés végezhető el benne, amelyekhez elektronnyalábra van szükség. A transzmissziós elektronmikroszkóp felbontóképessége jobb (0,2-2 nm), de nagy hátránya, hogy csak igen vékony minták vizsgálatára alkalmas. A tömbanyagú minták felülete csak közvetve, lenyomatkészítés segítségével vizsgálható, a lenyomatkészítés pedig időigényes, és az esetek többségében roncsolásos eljárást jelent.

2.3. Síkbeli (2D-s) mikrogeometriai jellemzők

A gépalkatrészek műszaki rajzon megadott felületei ideális mértani felületek. Az előzőekben már említett gyártási okok miatt a valóságos felület ettől mindig eltér. A valóságos felület – a mérőeszközök pontatlanságai miatt – pontosan nem ismételhető meg, ezért helyette az észlelt felületet fogadjuk el.
A valóságos felület eltérései az egyenetlenségek, amelyek a tényleges felületnek egy célszerűen választott mértani felülethez viszonyított kiemelkedései és bemélyedései. Jellegzetes egyenetlenségek az alakeltérések, a hullámosság, érdesség.
A valós felületnek az ideális felülettől való eltéréseit csoportosíthatjuk a formai jellemzők alapján valamint a keletkezésük szerint (HORVÁTH et al. 2005). BUSHAN (2001) munkájában az eltéréseket érdességre, hullámosságra, barázdákra és repedésekre osztja, továbbá az érdességen belül megkülönböztet nano- és mikroérdességet. KOZMA (1994) szerint a geometriai eltérések négy osztályba sorolhatók, úgymint makrogeometriai eltérések, hullámosság, érdesség és szubmikroérdesség. STOUT et al. (1993) és WHITEHOUSE (1994) ugyancsak formai eltérésekre, hullámosságra és érdességre választja szét a geometriai eltéréseket hullámhosszuk alapján.
A működő felületek mikrogeometriai jellemzése a gyakorlati méréstechnikában döntően kétdimenzióban valósul meg. A síkbeli (2D-s) mikrogeometriai paraméterekhez kapcsolódó fogalom-meghatározásokat és a jellemzőket nemzetközi szinten is szabványosították (ISO 4287:1997, ASME B46.1). A gépalkatrészekre vonatkozó rajzi előírások szabályait az ISO 1302:2002 szabvány

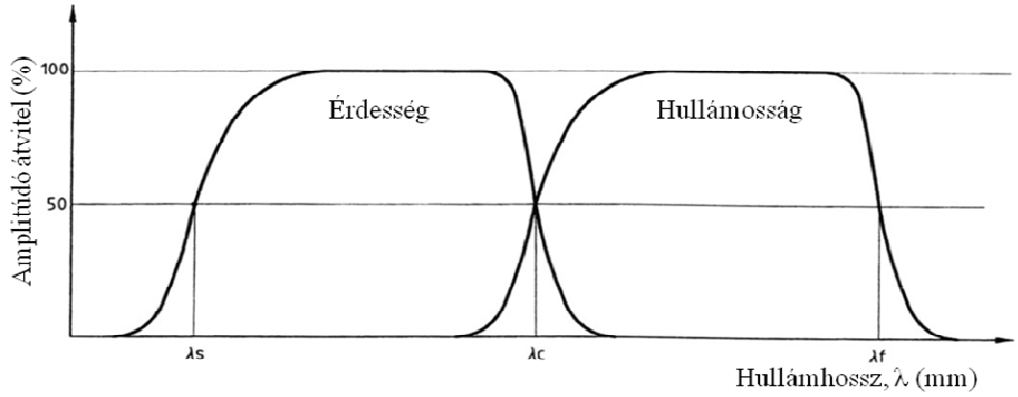
tartalmazza. Léteznek ugyan nemzeti szabványok, de ezek jelentéktelen műszaki eltérésekkel megegyeznek az ISO 4287:1997, és az ISO 4288:1996 nemzetközi szabványokkal.

E szabványok alapján a jellemzők három fő csoportba sorolhatók:

- az egyenetlenségek magasságával kapcsolatos jellemzők (*Ra, Rt, Rz, Rq, Rsk, Rku, Rp, Rv, Rc*),
- az egyenetlenségek profilirányú méreteivel kapcsolatos jellemzők (*RSm*),
- az egyenetlenségek formájával kapcsolatos (ún. hibrid) jellemzők (*RΔq*).

A profilmintázatok különféle mérőszámokkal írható le, amelyek önmagukban nem elegendőek a felület jellemzésére, két felület azonosnak minősítésére (GADELMAWLA et al. 2002). A felületi érdességi mérőszámok megállapításához a felületről szelvényeket (ún. profildiagramot) kell felvenni, forgástesteken a forgástengellyel párhuzamosan, sík felületen már általában két (egymásra merőleges) irány szükséges.

Az érdességi mérőszámok feladata, hogy jellemezzék a felületet. Követelmény, ha két felület mérőszáma azonos, akkor a két felület „minősége” egyforma. Külön – külön elemezve az érdességi mérőszámokat, azok egyike sem alkalmas önmagában arra, hogy meghatározza a felületet, és annak működési viszonyait. Ebből következik, hogy kettő, esetleg három, külön–külön, más-más jellegzetességet leíró mérőszám egyezése szükséges ahhoz, hogy a két felületet azonosnak lehet minősíteni.



2.7. ábra Az érdesség és a hullámosság szűrőkarakterisztikája (ISO 4287:1996)

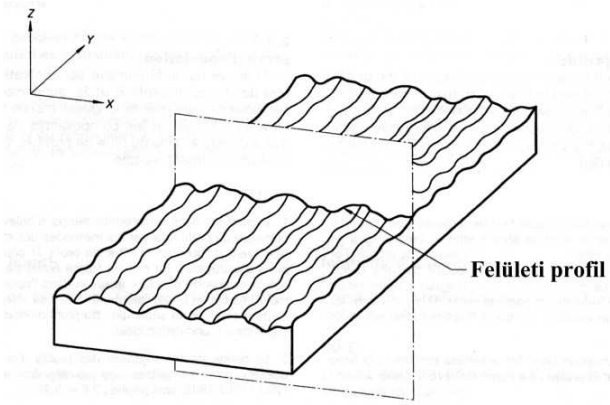
A profilok megkülönböztetése és szétválasztása a profilelemek hullámhossz-összetevői alapján történik a következőképpen (2.7. ábra):

- az érdességi profilt adják a λ_s és a λ_c határ-hullámhosszok közötti összetevők,
- a hullámossági profilt adják a λ_c és a λ_f határ-hullámhosszok közötti összetevők.

2.2. táblázat A hullámhossz határok választéka (ISO 4288-1996)

Hullámhossz határok választéka				
Periodikus profil	Nem periodikus profil		Határhullám hossza	Egyes-, teljes-mérőszakasz
Barázdatávolság S_m [mm]	*Rz* [μm]	*Ra* [μm]	λ_c [mm]	l_r / l_n [mm]
> 0,01 – 0,04 –ig	0,1 -ig	0,02 –ig	0,08	0,08 / 0,4
> 0,04 – 0,13 –ig	> 0,1 – 0,5 – ig	> 0,02 – 0,1 – ig	0,25	0,25 / 1,25
> 0,13 – 0,4 –ig	> 0,5 – 10 –ig	> 0,1 – 2 –ig	0,8	0,8 / 4
> 0,4 – 1,3 –ig	> 10 – 50 –ig	> 2 – 10 –ig	2,5	2,5 / 12,5
> 1,3 – 4 -ig	> 50	> 10	8	8 / 40

A műszerek mérési, valamint kiértékelési alapbeállításait is meghatározzák a szabványok. A felület finomságától függően választhatók meg az előírt beállítási értékek (2.2. táblázat).



2.8. ábra A felületi egyenetlenségek definiálására alkalmazott koordinátarendszer (ISO 4287:1996)

A paramétereket, melyek a következőkben ismertetésre kerülnek a szabvány és a szakirodalom következőképpen különbözteti meg: *R* - érdesség, *W* - hullámosság,

P - a nem szűrt profil betűjele mellé írjuk a paramétert jelző kis betűt, például: *a*, *t*, *p*, stb. A 2.8. ábra azt a koordináta rendszert ábrázolja, amelyben a felületi egyenetlenségek paramétereit definiáljuk.

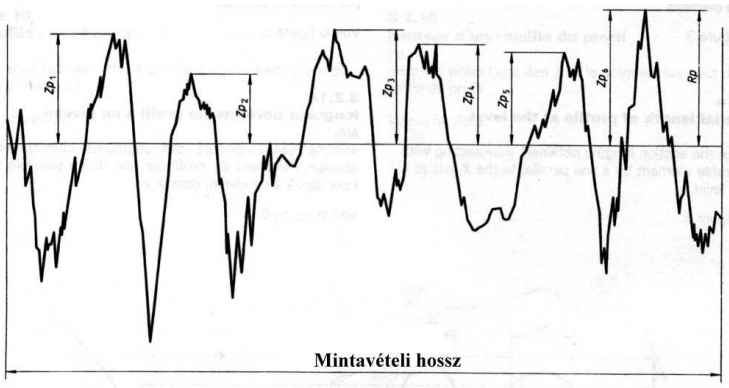
A vizsgált felület érdességének kiértékeléséhez profilmetszetet alkalmaznak, továbbá definiálják a következő fogalmakat: alapvonal, alaphossz, mérési hossz, középvonal, tetővonal illetve fenékvonal.
Alapvonal az észlelt profil síkjában lévő, az értékelés céljára kiválasztott vonal, melytől a profil egyes pontjainak a távolságát mérjük. Az alapvonal tulajdonképpen síkgörbe, kis szakasza egyenesnek vehető, a vizsgálat céljából „kiegyenesítjük" (szűrjük).
Alaphossz (vonatkoztatási hossznak) az érdesség kiértékelésére kijelölt hossz. Az alaphossz rögzítésével a hullámosság és az érdesség különválasztható, az érdesség az egyéb szabálytalanságok mellőzésével értékelhető.
A *mérési hossz* az érdességi kiértékelési hossz meghatározásához, méréstechnikailag szükséges felületszakasz minimális hossza, mely egy vagy több alaphosszat tartalmazhat.
A *középvonal* az a vonal, mely a valóságos profilt az alaphosszon belül úgy osztja ketté, hogy a profileltérések négyzetösszege a minimumot adja, vagyis a felette lévő kiemelkedések és az alatta lévő „völgyek" területe megegyezik.
Tetővonal illetve *fenékvonal* az észlelt profil - az alaphosszon belüli - legmagasabb illetve legmélyebb pontján megy át és párhuzamos a középvonallal.

2.3.1. A felületi mikrogeometria magassági jellemzői

a) „Csúcs" paraméterek

A profil maximális csúcsmagassága: *Rp* (alaphosszon értelmezve). A valóságos profil legmagasabb pontja és a középvonal közötti távolság az alaphosszon belül (2.9. ábra).

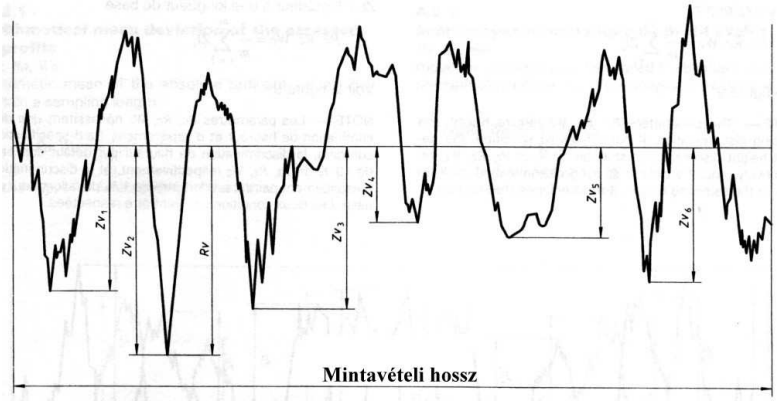
$$Rp = \sum_{i=1}^{5} Z_{p_i} \ [\mu m] \qquad (2.1)$$



2.9. ábra A felület csúcs méretei (ISO 4287:1996)

A profil maximális völgymélysége: *Rv* (alaphosszon értelmezve). A valóságos profil legmélyebb pontja és a középvonal közötti távolság az alaphosszon belül (2.10. ábra).

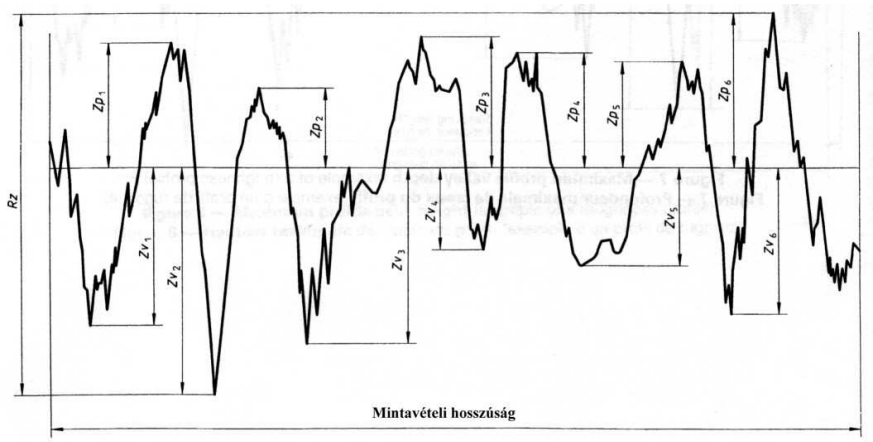
$$Rv = \sum_{i=1}^{5} Z_{v_i} \ [\mu m] \qquad (2.2)$$



2.10. ábra A felület völgy méretei (ISO 4287:1996)

A profil maximális magassága: *Rz* (alaphosszon értelmezve). A valóságos profil legmagasabb és legmélyebb pontja közötti távolság az alaphosszon belül (2.11. ábra).

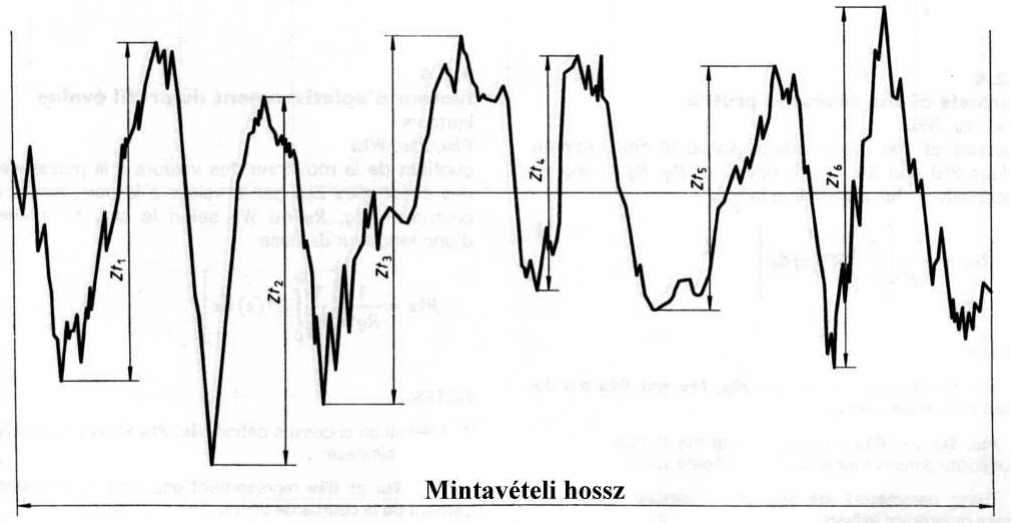
$$Rz = Rp + Rv \ [\mu m] \qquad (2.3)$$



2.11. ábra A profil maximális magassága (ISO 4287:1996)

A profilelemek közepes magassága: *Rc* (alaphosszon értelmezve). A valóságos profil legmagasabb és legmélyebb pontja közötti távolságok közepes magassága az alaphosszon belül (2.12. ábra).

$$R_c = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Z_{t_i} \text{ [µm]} \quad (2.4)$$



2.12. ábra Egyenetlenségek magasságának jelölése (ISO 4287:1996)

Maximális egyenetlenség: *Rt* (kiértékelési hosszon értelmezve).

$$Rt = Rp_{\max} + Rv_{\max} \text{ [µm]} \quad (2.5)$$

A valóságos profil legmagasabb és legmélyebb pontja közötti távolság az kiértékelési hosszon belül.

A DIN szabvány meghatározza a közepes érdességmélység értékét is, úgy, hogy a vizsgált profilt öt egyenlő részre osztva a szakaszokon vesszük a maximális eltéréseket, majd azokat átlagoljuk.

$$Rz_{DIN} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} R_{z_i} \text{ [µm]} \qquad (2.6)$$

Régebbi paraméter a profil űrtényező, melynek jó az információtartalma. A profil maximális csúcsmagassága és a profil maximális völgymélységének egymáshoz viszonyított értékét adja.

$$Kp = \frac{Rp}{Rz} \qquad (2.7)$$

b) „Átlag" paraméterek

A profil közepes eltérése: *Ra*

Az átlagos érdesség a tényleges profil és a középvonal közti Z_i távolságok abszolút értékeinek számtani átlaga.

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|dx \qquad (2.8)$$

$l = l_i$, $i = r, w, p$

A profil közepes mértani eltérése: *Rq*

A simasági mérőszám, melyet a profileltérések négyzetes középértéke.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l Z^2(x)dx} \qquad (2.9)$$

$l = l_i$, $i = r, w, p$

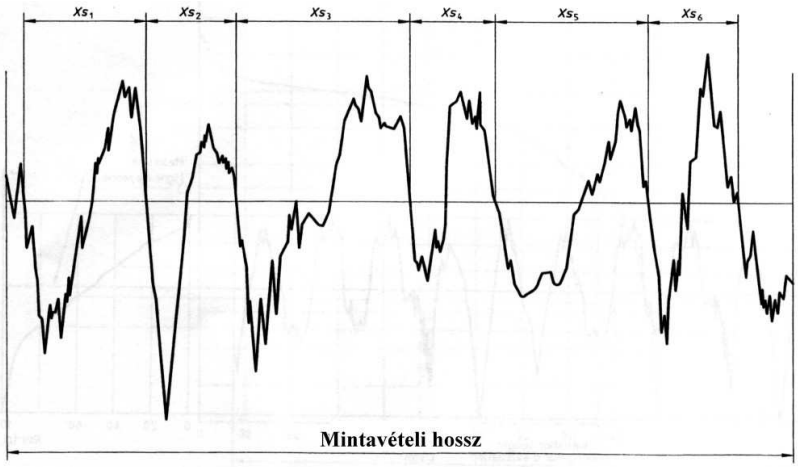
Ferdeségi mérőszám: *Rsk*

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3}\left[\frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} Z^3(x)dx\right] \qquad (2.10)$$

Lapultsági mérőszám: *Rku*

$$Rku = \frac{1}{Rq^4}\left[\frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} Z^4(x)dx\right] \qquad (2.11)$$

2.3.2. A felületi mikrogeometria profil irányú paraméterei



2.13. ábra Az egyenetlenségek profilirányú méretei (ISO 4287:1996)

Az egyenetlenségek közepes hullámhossza: *RSm*

$$RSm = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{S_i} \qquad (2.12)$$

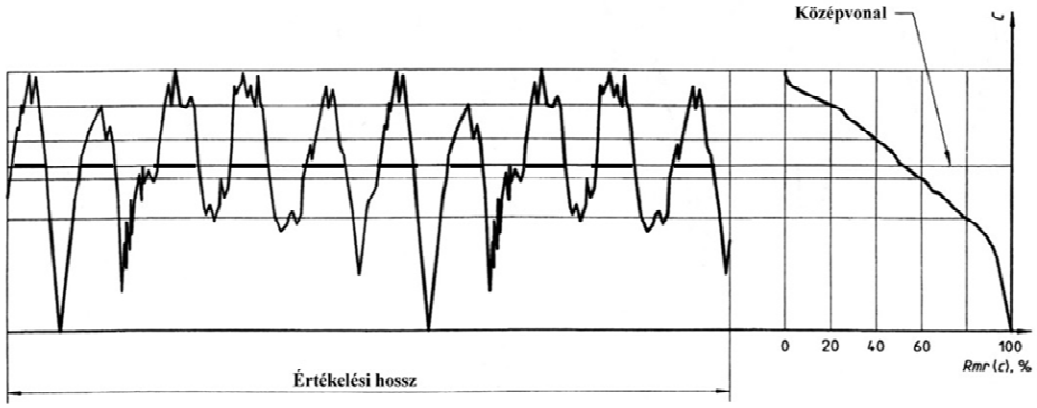
x_{si} a profil és a középvonal olyan két metszéspontjának a távolsága, melyek között a profilnak csak egy kiemelkedése és egy bemélyedése található (2.13. ábra).

2.3.3. A felületi mikrogeometria formai paraméterei

A profil hajlásának négyzetes középértéke: *RΔq*

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{z_{i+1}-z}{\Delta x}\right)} \qquad (2.13)$$

Jellemző görbék és kapcsolódó paraméterek



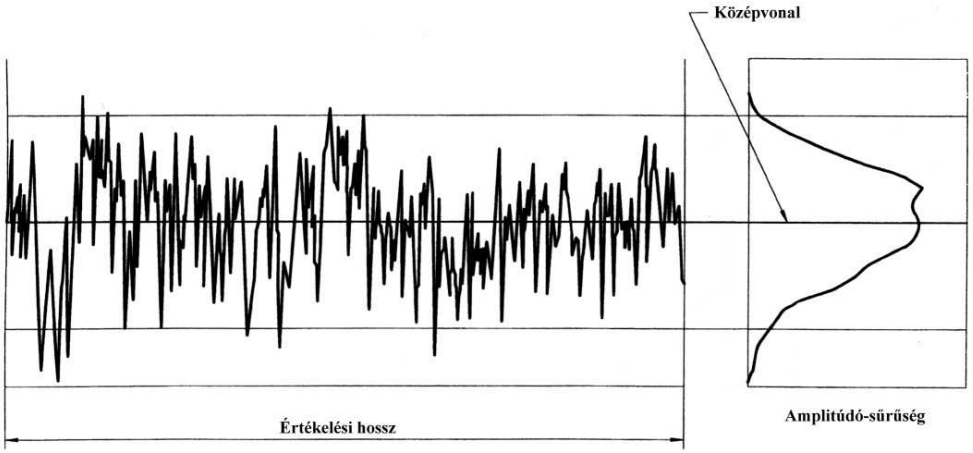
2.14. ábra A hordozóhossz és a hordozóhossz görbe (ISO 4287:1996)

Hordozóhossz arány: *Rmr*

$$Rmr(c) = \frac{M_l(c)}{l_n} \qquad (2.14)$$

$M_l\ (c)$ - hordozóhossz, a profil egy c magasságában meghúzott vonal által a profil kiemelkedésekből kimetszett „anyagszakaszok” összege,
l_n - a profil vizsgált hossza.

Hordozóhossz görbe (TPK) (2. 14. ábra jobb oldali görbéje)
Relatív hordozóhossz görbe (ADK) (2.14. ábra jobb oldali görbéje)



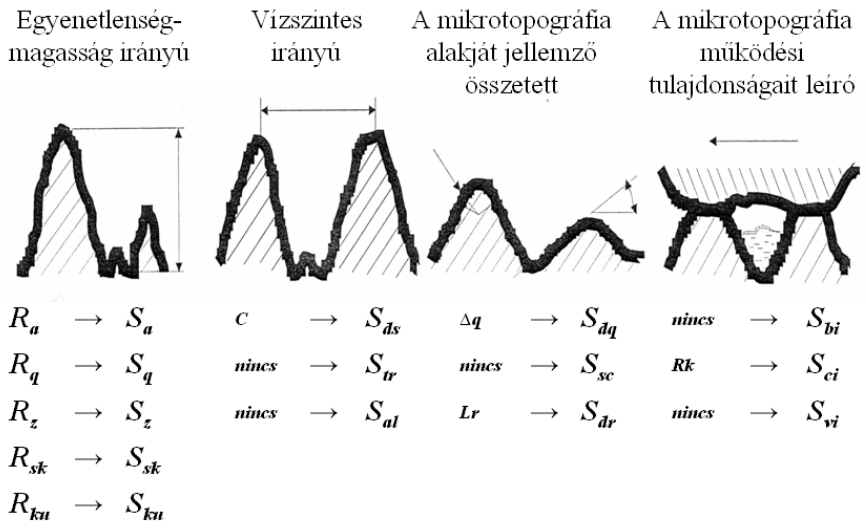
2.15. ábra Az amplitúdó sűrűségfüggvény képe (ISO 4287:1996)

2.4. A felület térbeli (3D-s) mikrotopográfiai jellezői

A mikrotopográfiai paraméterekkel történő jellemzés a felület térbeli egyenetlenségeinek lényegesen valósághűbb feltárását, kiértékelését teszi lehetővé. Alkalmasak olyan tulajdonságok kimutatására, számszerű jellemzésére is, amelyekre a 2D-s paraméterek nem (KOVÁCS et al. 1999 b), VERMA et al. 2005, CZIFRA et al 2007, WAIKAR et al. 2008). A térbeli (3D-s) feldolgozás igénye a 80-as évek második felében már megjelent, de a megvalósításra nem volt lehetőség, mert a nagymennyiségű adat feldolgozása – a számítógépek akkori műveleti sebessége miatt – akár több órát is igényelt volna. Ez a gyakorlati alkalmazhatóságot lehetetlenné tette. A 90-es évek első felében a hardver oldali feltételek alkalmassá váltak a térbeli feldolgozás megvalósítására és az Európai Unió Mérésügyi és Szabványosítási Bizottságának Alkalmazott Metrológia nevű projektje keretében elkészült egy ajánlás a műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése tárgyában. A 3D-s paraméterek jelentős része a 2D-ben jól ismert jellemzők egy dimenzióval magasabb szintre helyezésével keletkezett. A kutatás és az elemző laboratóriumi vizsgálatok szintjén megjelentek azonban újabb mérőszámok is (KOVÁCS et al. 2000).

A háromdimenziós mikrotopográfiai jellemzők geometriai információtartalmuk alapján az alábbiak szerint négy csoportba oszthatók (2.16. ábra):

- az egyenetlenségmagasság irányú, ún. amplitúdó jellemzők,
- az egyenetlenségmagasság vízszintes irányú, ún. térközi jellemzők
- a mikrotopográfia alakját leíró, ún. hibrid jellemzők és
- a mikrotopográfia működési tulajdonságait leíró, ún. funkcionális jellemzők (STOUT et al. 1993, KOVÁCS et al. 1999 (a)).



2.16. ábra A mikrotopográfiai jellemzők felosztása (KOVÁCS et al. 1999 (b))

Az egyes paraméterek megjelölésére a kétdimenziós jellemzőknél használt *R* (roughness) helyett a térbeliségre utaló *S* (surface) használják, a hagyományos konkrét geometriai tartalomra utaló alsó index (pl. *Sa*, *Sq*, *Sz*, stb.) alkalmazásával (PALÁSTI et al. 2001).

2.4.1. Az egyenetlenség magasságirányú (amplitúdó) jellemzői

Átlagos egyenetlenség (Arithmetical Mean Deviation of the Surface): *Sa*

$$Sa = \frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\left|\eta(x_i, y_j)\right| \quad (2.15)$$

Kétdimenziós megfelelője az *Ra* átlagos érdesség. Az $\eta(x_i,y_j)$ a letapogatott felület *j*-edik sor *i*-edik pontjának – mint felületi pontnak – az illeszkedő felülettől mért merőleges távolsága.

Az illeszkedő felülettől való eltérések geometriai középértéke (Root-Mean-Square Deviation of the Surface): *Sq*

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\eta^2(x_i, y_j)} \quad (2.16)$$

A $z(x,y)$ felületi pontoknak az illeszkedő felület körüli szórását adja meg. $\eta(x,y)$ négyzetre emelése következtében igen érzékenyen reagál a nagyobb felületi kiemelkedésekre, illetve mélyedésekre. Kétdimenziós megfelelője az *Rq* simasági mérőszám. Az $\eta(x_i,y_j)$ a letapogatott felület *j*-edik sor *i*-edik pontjának – mint felületi pontnak – az illeszkedő felülettől mért merőleges távolsága. Általános és széles körben alkalmazott paraméter. Kiugró értékekre érzékenyebben reagál, mint az *Sa* átlagos érdesség

A felület tízpont-magassága (Ten Point Height of the Surface): *Sz*

$$Sz = \frac{\sum_{i=1}^{5}\left|\eta_{pi}\right| + \sum_{i=1}^{5}\left|\eta_{vi}\right|}{5} \quad (2.17)$$

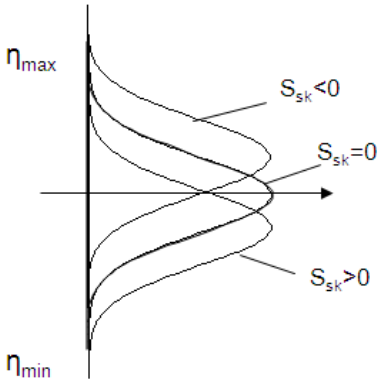
Sq-val ellentétben szélsőértéket jelentő paraméternek tekinthető. Kétdimenziós megfelelője az *Rz* egyenetlenségmagasság. Ahol η_{pi} és η_{vi} (i = 1,2,…,5) az öt legmagasabb csúcs illetve az öt legmélyebb völgy magassága illetve mélysége az illeszkedő felülettől (sík felület esetében a középsíktól) mérve.

Térbeli esetben geometriai értelemben csúcsnak (illetve völgynek) tekinthető az a felületi pont, amelyik magasabb (illetve alacsonyabb) mint nyolc közvetlen szomszédja.

A felületi topográfia magasságeloszlásának ferdesége (Skewness of Topography Height Distribution): *Ssk*

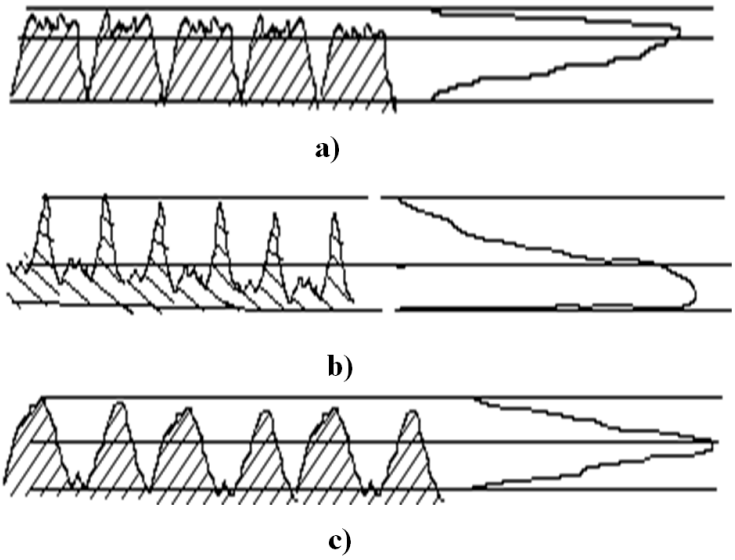
$$Ssk = \frac{1}{MNSq^3} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{M} \eta^3(x_i, y_j) \qquad (2.18)$$

Ez a paraméter a felületi topográfia magasságeloszlás-függvényének alakját – a középsíkhoz (vagy magasabb rendű felületek esetén a polinomiális középfelülethez) viszonyított aszimmetriáját jellemzi (2.17. ábra). Síkbeli megfelelője az *Rsk* profi aszimmetria mérőszám.



2.17. ábra. A magasságeloszlás – aszimmetria értelmezése (KOVÁCS et al. 2000 (a))

Geometriai tartalma azonos kétdimenziós párjával. Úgynevezett gaussi felületeknél – ahol az egyes felületi pontok magasságeloszlásának függvénygörbéje szimmetrikus - *Ssk* értéke nulla. *Ssk* negatív, ha a magasságeloszlás – görbének hosszabb része jelenik meg a középsík feletti oldalon, és pozitív a fordított esetben.



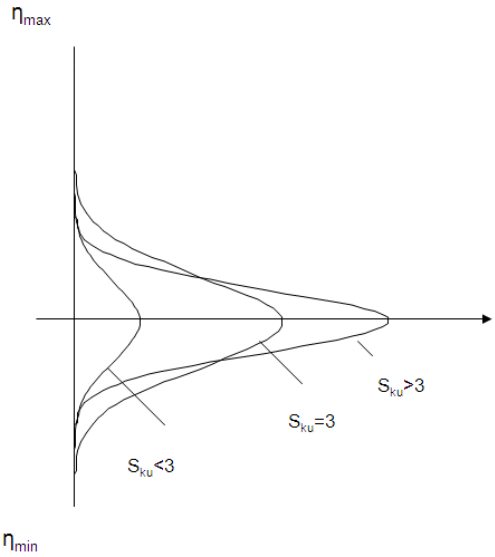
2.18. ábra. S_{sk} geometriai, illetve működési jelentése
a) *Ssk* < 0, b) *Ssk* > 0, c) *Ssk* = 0 (KOVÁCS et al. 2000 (a))

Három esetet jól szemlélteti egy-egy jellegzetes profillal a 2.18. ábra. Az *Ssk* < 0, negatív értéke esetén jó hordozótulajdonságú, kopásálló felületről van szó. Az *Ssk* > 0, pozitív érték esetén, a felületen több-kevesebb hegyes csúcs található, amelyek igen gyors kezdeti kopást eredményeznek. *Ssk* értéke a felület bejáródása, kopása során csökken.

A felületi topográfia magasságeloszlásának hegyessége (Kurtosis of Topography Height Distribution): *Sku*

$$Sku = \frac{1}{MNSq^4} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{M} \eta^4(x_i, y_j) \qquad (2.19)$$

Az *Sku* a topográfia magasságeloszlás-görbéjének csúcsosságát, hegyességét, tehát szórását (szórásterjedelmét) jellemzi (2.19. ábra). Síkbeli megfelelője az *Rsk* lapultsági mérőszám. A már említett gaussi felületeknél *Sku* = 3 értékű.



2.19. ábra. A magasságeloszlás hegyességének értelmezése (KOVÁCS et al. 2000 (a))

Ez utóbbi két paraméter jól jellemzi az egyenetlenségek formáját, és ez által utalnak a felületek működési jellemzőire is.

2.4.2. Az egyenetlenség vízszintes irányú (térközi) jellemzői

A felület csúcssűrűsége (Density of Summits of the Surface): *Sds*

A felület csúcssűrűsége: az egységnyi nagyságú mintavételi felületre eső felületi csúcsok száma. Síkbeli megfelelője a *Pc* csúcsszám.

$$Sds = \frac{Csúcsok \quad száma}{(M-1)(N-1)\cdot\Delta x\cdot\Delta y} \qquad (2.20)$$

M az *x* tengely irányában, *N* az *y* tengely irányában vett mérési pontok száma;
Δx és *Δy* a jelzett irányokban alkalmazott mintavételi távolság.

Textúrahelyzet viszonyszám (Texture Aspect Ratio of the Surface): *Str*

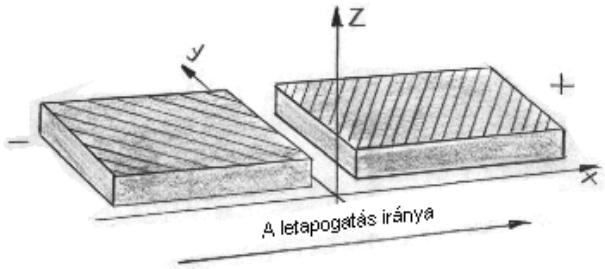
$$Str = \frac{Az \quad AACF \quad leggyorsabb \quad csillapodási \quad távolsága \quad 0{,}2-es \quad értékre}{Az \quad AACF \quad leglassúbb \quad csillapodási \quad távolsága \quad 0{,}2-es \quad értékre} \qquad (2.21)$$

A textúra mintázat fő jellegének, helyzetének meghatározására alkalmas paraméter. Kiszámításához a vizsgált felület térbeli autókorrelációs függvényének (Areal Autocorrelation Function = *AACF*) kiszámítására van szükség. *Str* kimutatja, hogy homogén (izotróp) vagy meghatározott textúra iránnyal bíró (anizotróp) felületről

van-e szó. Minden esetben igaz, hogy 0 < *Str* <1. Az *AACF* csillapodása leggyorsabb a meghatározó jellegzetes textúra irányra merőlegesen, leglassúbb pedig a karakterisztikus textúra irány mentén. Ebből következik, hogy minél kisebb az *Str* függvény értéke, annál határozottabb a textúra anizotróp jellege. Izotróp felület esetén *Str* értéke közel 1. Síkbeli megfelelője nincs.

A felület textúrairánya (Texture Direction of the Surface): *Std*

A jellegzetes textúra irány y-tengelyhez viszonyított helyzetének meghatározására alkalmas paraméter. Az egységes értelmezés érdekében a 2.20. ábrának megfelelően a jobbra hajló barázdairány pozitív, a balra hajló negatív előjellel kerül számításba. Ebből következik, hogy *Std* = 0, ha a textúrairány merőleges a letapogatási irányra.



2.20. ábra. A felület textúra irányának értelmezése (KOVÁCS et al. 2000 (a))

β az az irány, ahol az *APSD* –nek (Areal Power Spectral Density) azaz a felületi energiaspektrum sűrűségnek a maximális értéke van. Az *Std* paraméternek síkbeli megfelelője nincs.

A leggyorsabb csillapodású autókorrelációs hossz (The Fastest Decay Autocorrelation lenght): *Sal*

$$Sal = \min(\sqrt{\tau_x^2, \tau_y^2}), \widetilde{R}(\tau_x, \tau_y) \leq 0{,}2 \quad (2.22)$$

Hosszúságdimenziójú paraméter, az *AACF* autókorrelációs jellegének leírására alkalmas. Az *AACF*-nek az a horizontális távolsága, amelyen a leggyorsabb csillapodást mutatja 0,2-es értékre minden irányban megvizsgálva a felületi autókorrelációs függvény viselkedését. Anizotrópikus (tehát jellegzetes textúra iránnyal bíró) felületeknél *Sal* a jellegzetes felületi textúra irányra merőlegesen jelenik meg. Síkbeli megfelelője nincs.

2.4.3. Az egyenetlenség összetett geometriai (hibrid) jellemzői

A felületi mikrotopográfia úgynevezett hibrid paramétereit az amplitúdó (magasságirányú) valamint a térközi (vízszintes irányú) jellemzői alapján számítjuk. geometriai tartalmuknál fogva a mikrotopográfia alaki tulajdonságainak leírására alkalmasak.

A felületi mikrogeometria hajlásának geometriai középértéke (Root-Mean-Square Slope of the Surface): $S\Delta q$

A felület mikrotopográfiája hajlásának (dőlésének) négyzetes középértékét adja meg a mintavételi felületen belül. Síkbeli megfelelője a Δq, amely a profil hajlásának (dőlésének) geometriai átlaga.

$$S\Delta q = \sqrt{\frac{1}{(M-1)\cdot(N-1)}\sum_{j=2}^{N}\sum_{i=2}^{M}\rho_{i,j}^{2}} \quad (2.23)$$

ahol

$$\rho_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta(x,y)}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial\eta(x,y)}{\partial y}\right)^{2}}\Bigg|_{x=x_i,\,y=y_i} \quad (2.24)$$

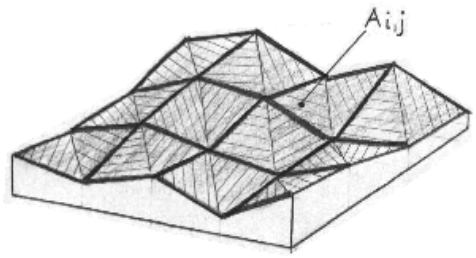
A felületi csúcsok görbületének számtani középértéke (Aritmetic Mean Summit Curvature of the Surface): *Ssc*

$$Ssc = -\frac{1}{2\cdot n}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\eta^{2}(x,y)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial\eta^{2}(x,y)}{\partial y^{2}}\right)\Bigg|_{valamennyi\ \ csúcsra} \quad (2.25)$$

Megadja a csúcsok főgörbületeinek átlagát a mintavételi felületen belül. Minthogy a felület egy pontjának (pl. egy felületi csúcsnak) két egymásra merőleges irányban számított görbületei összege egyenlő a főgörbületek összegével, így megadható a felületi csúcsok görbületeinek átlagával (számtani középértékével). Közvetlen 2D-s megfelelője nincs, közelítőleg összefüggésben van a *Pc* -vel (profilelemek közepes magasságával).

Felületarány (Developed Interfacial Area Ratio): *Sdr*

A létrejött felület mintavételi felülethez (mint ideális sík vagy egyéb polinomiális felülethez) viszonyított növekményének és a mintavételi felületnek az arányát adja meg. Meghatározásához az észlelt felületet a 2.21. ábra szerint elemi háromszöglapocskákkal fedjük be.



2.21. ábra. A felület elemi háromszöglapocskákkal való lefedése *Sdr* kiszámításához (KOVÁCS et al. 2000 (a))

$$Sdr = \frac{\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{M-1} A_{i,j} - (M-1)\cdot(N-1)\cdot\Delta x\cdot\Delta y}{(M-1)\cdot(N-1)\cdot\Delta x\cdot\Delta y} \qquad (2.26)$$

$A_{i,j}$ az (x_i,y_j) csúcspont-koordinátájú elemi háromszöglapocska területe. Az *Sdr* paraméter nagyobb értéke vagy az amplitúdó jellegű, vagy a vízszintes (térközi) jellegű tulajdonságok szignifikanciáját jelzi, esetleg a kettő együttes hatására utal.

Hordozófelületi arány (Surface Bearing Area Ratio): *Stp*

Ha a felületet a középsíkkal (vagy nem síkfelületek esetén az illeszkedő polinomiális felülettel) párhuzamos felülettel h magasságban elmetsszük és az így kapott metszési felület nagyságát viszonyítjuk a mintavételi felület nagyságához, akkor az adott metszési magassághoz tartozó hordozófelületi arányt kapjuk. Ez természetesen függvénye a metszési szint magasságának.

$$Stp(h) = \frac{A(h)}{(M-1)\cdot(N-1)\cdot\Delta x\cdot\Delta y} \qquad (2.27)$$

$$A(h) = \sum_{i=1}^{(M-1)\cdot(N-1)} A_i(h) \quad , \quad 0 \le A_i(h) \le \Delta x\cdot\Delta y \qquad (2.28)$$

Vagyis *A(h)* a *h* metszési magasságnál számított hordozófelület. Síkbeli megfelelője a t_p viszonylagos hordozóhossz.

2.4.4. Funkcionális (működési tulajdonságokat leíró) jellemzők

Az egymással kapcsolatban lévő, működő felületek topográfiai jellege alapvetően meghatározza azok működési jellemzőit. Mivel a felületekkel szemben támasztott követelmények skálája igen széles, az érintkezéses működési állapottól (kopás,

súrlódás, hő- és villamos vezetés, tömítés, lokális nyomáseloszlás, hőmérséklet eloszlás, stb.) az érintkezésmentes működési feltételeken át (optikai követelmények, felületkezelési technológiák) az egészen speciális alkalmazási területekig (élő szervezetbe ültetett pótlások) ezért az alábbi paraméterek az alkalmazásnak csupán egy részterületét képesek lefedni. Ezek bizonyos hordozótulajdonságokat jellemző függvények, bejáródási viselkedést tükröző paraméterek valamint kenőanyag-megtartási képességre utaló kifejezések.

Hordozófelületi jelzőszám (Surface Bearing Index): *Sbi*

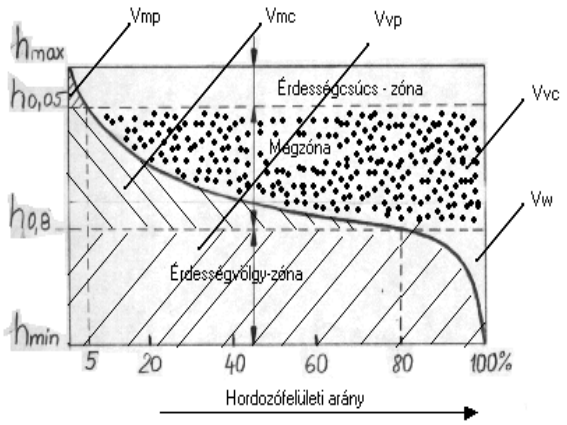
Sq valamint az 5%-os hordozófelületi arányhoz tartozó érdesség magasság hányadosa, azaz:

$$Sbi = \frac{Sq}{\eta_{0,05}} \qquad (2.29)$$

η = 0,05 az 5%-os hordozófelületi arányhoz tartozó érdesség magasság (a középsíktól mérve). Kiszámításához szükséges a hordozófelület előzetes meghatározása. A nagyobb hordozófelületi jelzőszám jobb hordozótulajdonságokat jelez. Értéke a felület kopása során nő. Közvetlenül utal a felület bejáródási folyamatára, bejáródási viselkedésére.

A magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma (Core Fluid Retention Index): *Sci*

Meghatározásához előzetesen definiálni kell a magzóna fogalmát. Ha a vizsgált felület hordozófelületi görbéjében két vízszintes egyenest húzunk úgy, hogy az egyik 5%-os hordozófelületnél (η = 0,05) a másik 80%-os hordozófelületnél (η = 0,8) metszi a görbét, akkor a hordozófelületi görbét három részre osztottuk (2.22. ábra).



2.22. ábra. A magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám értelmezése (KOVÁCS et al. 2000 (a))

Ennek felhasználásával tehát az *Sci* meghatározható, mint
Vmp - a csúcszóna anyagtérfogat hányada;
Vvp - a csúcszóna ürestérfogat hányada;
Vmc - a magzóna anyagtérfogat hányada;
Vvc - a magzóna ürestérfogat hányada;
Vmv - a völgyzóna anyagtérfogat hányada;
Vvv - a völgyzóna ürestérfogat hányada.

Sci tehát a magzóna üres térfogata bármely egységnyi mintavételi felület felett, viszonyítva ugyanazon felület *Sq* értékéhez. A felület kopási folyamatának előrehaladtával *Sci* értéke csökken, amely egyben a felület kenőanyag-megtartási képességének csökkenését is jelenti. Síkbeli közelítő megfelelője az *Rk* paraméternek.

A völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma (Valley Fluid Retention Index): *Svi*

$$Svi = \frac{1}{S_q} \frac{V_{v(h0,8)}}{(M-1)\cdot(N-1)\cdot\Delta x\cdot\Delta y} \qquad (2.30)$$

Sci -vel rokon paraméter, vagyis a völgyzóna egységnyi mintavételi felülethez tartozó üres térfogatának *Sq*-hoz viszonyított értéke. *Svi* nagyobb értéke a völgyzóna jó folyadék (pl. kenőanyag) megtartási képességét jelzi.

A fentiekben ismertetett paraméterek tehát a műszaki felületek mikrotopográfiájának térbeli- tehát a valós viszonyokat jobban tükröző-jellemzésére alkalmasak (PALÁSTI et al. 1998, DUDÁS et al. 2005, QUINSAT et al. 2008). Ezen a területen is megkezdődött a mérőszámok szabványban történő rögzítése (ISO/DIS25178-2, ISO/DIS25178-3, melyek szabványtervezet formájában kerültek kiadásra, de a közeljövőben már várható a tényleges szabvány megjelenése (BLAYTEYRON et al. 2007).

2.5. A forgácsolt felület minőségének kialakulására ható tényezők

A gyártás során előállított felület, mint kölcsönhatásban lévő, egymáson elmozduló felületek (munkadarab – szerszám – forgácsoló mozgások) egyik eleme van jelen. Akár a felületi topográfia tudatos létrehozását, akár a létrehozott felület topográfiájának működés közbeni változását nézzük, tribológiai szempontból mindkét folyamatot kopási folyamatként értelmezhetjük. Ebből következően kiemelten fontos, hogy a befejező megmunkálásoknál – ahol a működő felületek működési igények szerinti előállítása a cél – a topográfia tervezéséhez vizsgáljuk a tribológia tudománya által feltárt törvényszerűségeket, jelenségeket is

Fémek forgácsolásakor, alakításakor a megmunkált felületen mikro-egyenetlenségek keletkeznek. A létrejövő felület alapvetően három forrásból származó hatásrendszer szuperpozíciójaként értelmezhető (2.3. táblázat).

Nagy forgácsvastagságok leválasztásakor ($h \geq 0{,}2$ mm) döntő részben az első csoportbéli tényezők határozzák meg a mikro-egyenetlenségek alaki jellemzőit.

A forgács méreteinek csökkentésével ($h \leq 0{,}2$ mm) a 2. és 3. csoport befolyásoló tényezői egyre nagyobb súllyal vesznek részt a felület kialakításában. Ekkor a kizárólag mozgás- és szerszámgeometriát tartalmazó képletek a mért érdességtől jelentősen eltérő eredményeket szolgáltatnak, megváltoztatják a felületi réteg tulajdonságait.

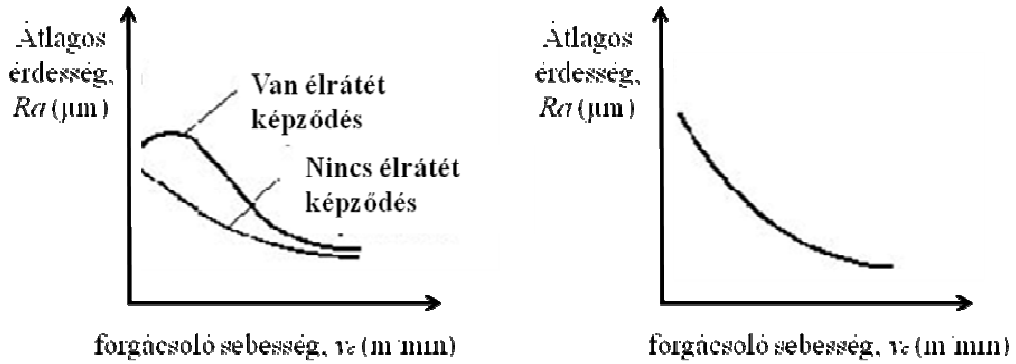
2.3. táblázat Forgácsolt felületek minőségére ható tényezők (PALÁSTI 2001)

A FORGÁCSOLÁSSAL ELŐÁLLÍTOTT FELÜLETEK MINŐSÉGÉRE HATÓ TÉNYEZŐK				
Mozgás- és élgeometriai érdesség (vagy kinematikai érdesség) 1.		A forgácsleválasztás mechanizmusa 2.		A rendszert érő dinamikus hatások 3.
A vágóél/élek (mdb-hoz viszonyított) relatív elmozdulása.	A vágóél/élek alakjának hatása	Képlékeny alakváltozások a felületen. Felrakódások a szerszámon. A minimálisan leválasztható forgácsvastagság	A szerszám munkadarabbal érintkező felületének (határfelületének) járulékos hatása.	Az MKGS rendszer gerjesztett és öngerjesztett rezgései.
BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK				
Előtolás nagysága, iránya	Főél (mellékél) profilja	A működő él geometriája és minősége	A hátfelületi kopás-formája	Az MKGS rendszer merevsége, állapota, pontossága
Forgácsoló sebesség	Csúcssugár	A szerszám és a munkadarab anyagának kölcsönhatása.	A csúcskopás A mellékél kopás-formája	A forgácsolóerők nagysága Az Fc, Ff, Fa viszonya egymáshoz
Kis előtolásoknál a stick-slip effektus	A fő- és mellékél elhelyezési szög	A munkadarab anyagának rugózása	A forgácsolási idő	Technológiai adatok Forgácsolási körülmények

A működő felületek tehát a forgácsolási folyamat bonyolult rendszerében alakulnak ki és e kapcsolatrendszer elemei igen összetett hatást gyakorolnak a kialakuló mikrogeometriára, mikrotopográfiára, továbbá a felületi réteg fizikai-kémiai jellemzőire.

A felület a forgácsolási folyamat bonyolult rendszerében alakul ki. Ezen kapcsolatrendszer elemei igen összetett hatást gyakorolnak a kialakuló mikrogeometriára, így a felületi érdességre is (ANGYAL et al. 1988).
Az érdességet befolyásoló tényezők hatásai:

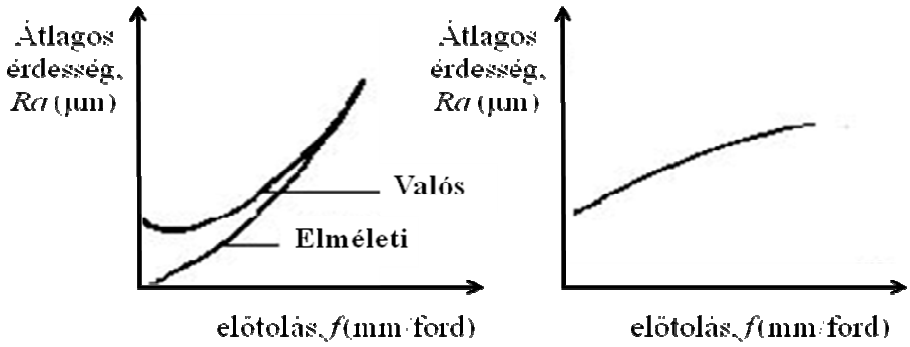
- geometriailag határozott éllel történő forgácsoláskor (2.23. a) ábra).
- geometriailag határozatlan éllel történő forgácsoláskor (2.23. b) ábra).



a) b)

2.23. ábra. A felületi érdesség a forgácsoló sebesség függvényében (ANGYAL et al. 1988)

A *forgácsoló sebesség* hatása különböző attól függően, hogy forgácsolás közben keletkezik-e élrátét vagy sem (2.23. a) ábra). A felületi érdesség értéke kisebb, ha a forgácsoló sebesség nő az élrátétes zónán kívül.

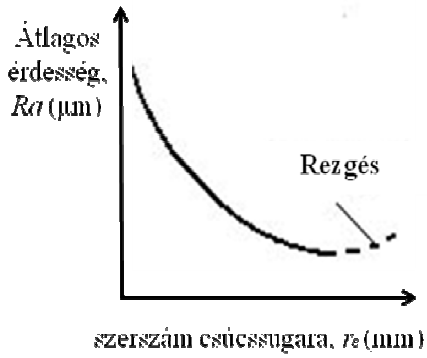


a) b)

2.24. ábra. A felületi érdesség az előtolás függvényében (ANGYAL et al. 1988)

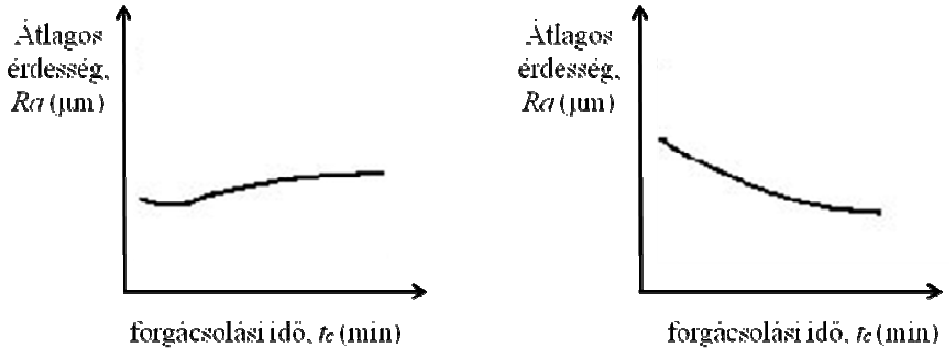
Az *előtolás* értékét növelve az átlagos érdesség is növekszik, mint ahogy azt a 2.24. ábra mutatja.

A *csúcssugár* növelésével kisebb egyenetlenséget kapunk (2.25. ábra), geometriailag határozatlan éllel történő forgácsoláskor viszont a forgácsoló-szemcse méretének növelésével a felületi érdesség is nő.



2.25. ábra. A felületi érdesség a csúcssugár függvényében (ANGYAL et al. 1988)

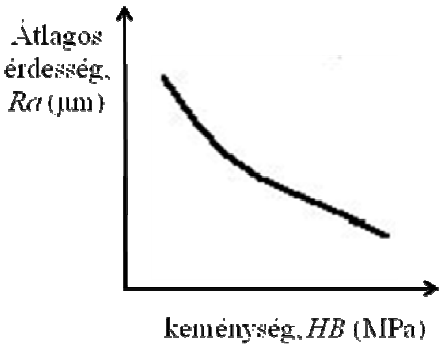
A *forgácsolási idő* a szerszám élének és hátfelületének kopásán keresztül hat a megmunkált felület érdességére. A forgácsolási idő növelésével tendenciájában az érdesség is nő határozott éllel történő forgácsoláskor, de nem mindig folyamatosan (2.26. a) ábra). Ezt a jelenséget a szerszámcsúcs hátfelületén kialakuló kopáshornyoknak a forgácsolási idő alatt bekövetkező alaki változásaival magyarázhatjuk. Határozatlan éllel (köszörülés, szuperfiniselés stb.) történő forgácsoláskor a forgácsolási idő növekedésével az érdesség csökken, mint ahogyan ezt a 2.26. b) ábra mutatja.



a) b)

2.26. ábra. A felületi érdesség a forgácsolási idő függvényében (ANGYAL et al. 1988)

A *munkadarab anyaga keménységének és szilárdságának* növelésével csökken a felületi érdesség, mivel a keményebb anyagok forgácsoláskor kevésbé kenődnek, szemcséik nehezebben tépődnek ki (2.27. ábra).



2.27. ábra. A felületi érdesség a munkadarab keménységének függvényében (ANGYAL et al. 1988)

A *homlokszög* csökkentése (negatívba fordulása) általában növeli a felületi érdességet. A *hűtő-kenő folyadékok* előnyösen befolyásolják a forgácsképződés körülményeit, javítják a megmunkált felületek minőségét, csökkentik a felületi érdességet.

2.6. Az érdesség meghatározása egyélű szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett esztergálásnál

A forgácsolással előállított felületek mikrogeometriáját számos tényező határozza meg (PALÁSTI 1983, PALÁSTI 2001, SIPOS et al. 2006, PALÁSTI et al. 2007). A felület elméleti érdességét alapvetően a megmunkáló szerszám és az előtolás befolyásolja (LIU et al. 2006). Ez alapján a felületi érdesség és a szerszám csúcssugara közötti kapcsolat az alábbi összefüggéssel írható fel (ANGYAL et al. 1988):

$$R_{elm} = r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{2}} \qquad (2.31)$$

$$R_{elm}{}^2 + 2R_{elm} \cdot r_\varepsilon + r_\varepsilon^2 = r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{4} \qquad (2.32)$$

Az $Relm << r_\varepsilon$, ezért négyzete valamint a vegyes szorzat is elhanyagolható, így az egyenetlenség magasság összefüggése:

$$\mathrm{Re}lm = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad (2.33)$$

Relm: elméleti érdesség [μm],
f: előtolás [mm/ford],
r_ε: a lapka csúcssugara [mm].

A szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett forgácsoláskor az elméleti érdességet tehát az ún. Bauer-féle (ANGYAL et al. 1988, PALÁSTI et al. 2005) összefüggés írja le (2.33)

A várható érdesség elméleti meghatározására az ún. Brammertz-féle képletet érdemes alkalmazni acélok simító esztergáláskor (2.34). Ez az összefüggés figyelembe veszi a leválasztható minimális forgácsvastagságot (h_{min}) (2.35) és ehhez kapcsolódóan a forgácsoló sebesség hatását is (PALÁSTI et al. 2005):

$$\mathrm{Re}_{Br} = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} + \frac{h_{\min}}{2} \cdot (1 + \frac{r_\varepsilon \cdot h_{\min}}{f^2}) \qquad (2.34)$$

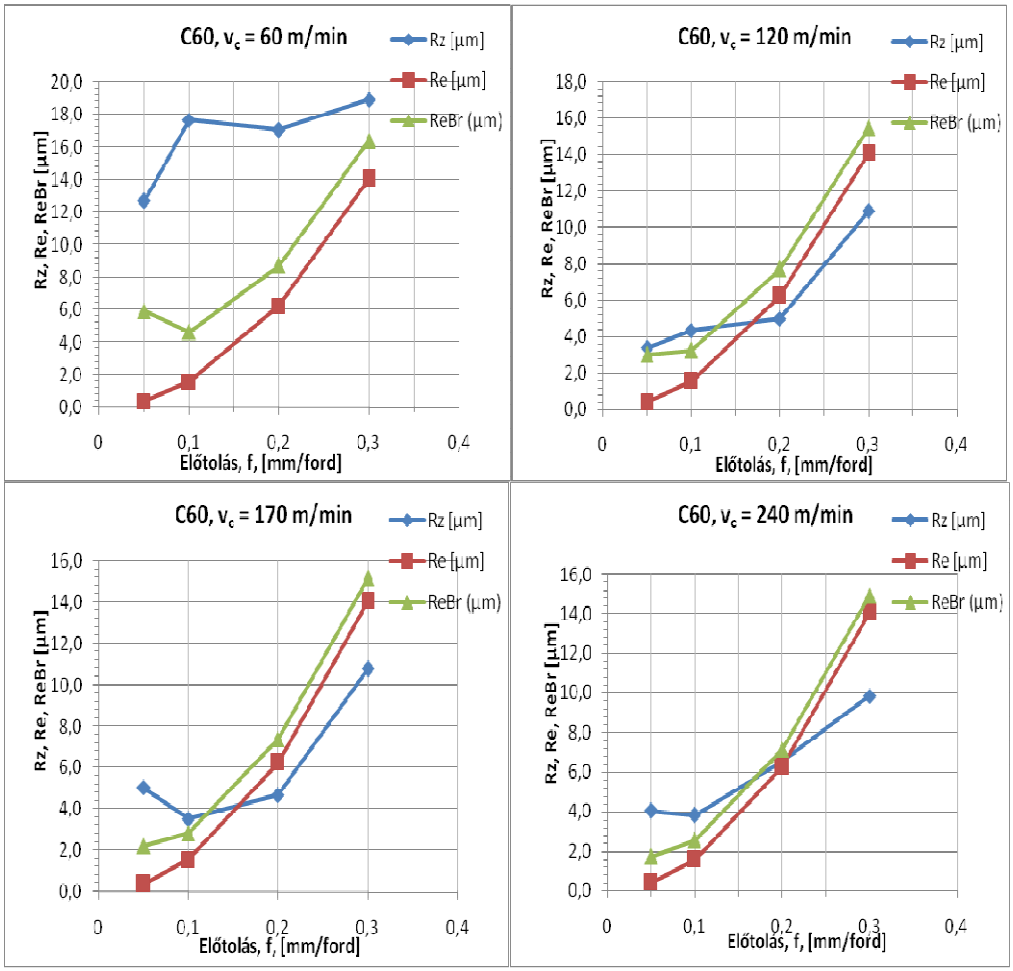
$$h_{\min} = 84 \cdot v_c^{-0,7} \cdot r_n^{0,25} \qquad (2.35)$$

Re_{Br}: elméleti érdesség [μm],
f: előtolás [mm/ford],
r_ε: a lapka csúcssugara [mm],
h_{min}: a leválasztható minimális forgácsvastagság [μm],
v_c: forgácsoló sebesség [m/min],
r_n: éllekerekedés [μm].

Fémek esetében számos kísérlet igazolta, hogy a tárgyalt összefüggések (2.31)-(2.35) közel sem nevezhetők általánosnak és átfogónak. A 2.28. ábra egy esztergált C60 acél mikrogeometriai vizsgálatának eredményét mutatja az előtolás illetve a forgácsolási sebesség függvényében (PALÁSTI 1983).

A C60 acél esztergálása során alkalmazott forgácsolási paraméterek:

- a forgácsoló kés geometriája: $\kappa_r = 95^\circ$; $\alpha_0 = 6^\circ$; $\lambda_s = -6^\circ$; $r_\varepsilon = 0,8$ mm;
- forgácsolási sebesség, $v_c = 60; 120; 170; 220$ m/min;
- előtolás, $f = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$ mm;
- fogásmélység, $a = 0,5$ mm;
- munkadarabok mérete: ø 64x210 mm.



2.28. ábra Az elméleti (*Re*, Re_{Br}) és a tényleges érdesség (*Rz*) C60 acél esztergálásnál

Az *Rz* értéke a vizsgált tartományban az elméleti érdesség monoton növekvő görbéjét nem követte. Kis előtolásoknál (f = 0,05-0,1 mm) az eltérés igen számottevő, amely a forgácsolási sebesség növelésével valamelyest csökken, de a nagyobb előtolások tartományában (f = 0,2-0,3 mm) az elméleti és a mért érdesség közti különbség nem számottevő. Acélok esetében azt tapasztalhatjuk tehát, hogy az egyszerű, geometrián alapuló képlet a kisebb előtolási tartományban megengedhetetlenül nagy hibával írja le a várható érdességet, a műszaki gyakorlat mégis széles körben használja (FARKAS et al. 2005). Látható viszont, hogy a Brammertz-formula a kis előtolások tartományában is jobb közelítést ad.

Az egyélű szabályos élgeometriájú szerszámmal történő forgácsolákor keletkező felületi mikrogeomtriával több kutatás foglalkozott, melyek a befejező megmunkálás megfelelő szerszám- és technológiai paramétereinek meghatározására irányultak. A valós mikrogeometriát kísérleti mérésekkel és

matematikai összefüggésekkel lehet leírni. A régebbi kutatók által (ISZAJEV 1953, DJACSENKO 1959) a kísérleti vizsgálatokból levezetett képletek több tényező hatását vették figyelembe (v_c, f, a, r_ε, kopás, hűtés-kenés), amelyek ma is jó alapot szolgáltatnak az ilyen jellegű vizsgálatoknak.
Számos kutató igyekezett tisztázni a különböző ható tényezők szerepét (PEKELHARING 1966, OLSEN 1970, DEGNER 1971, ENACHE 1972, WHITEHOUSE et al. 1974, NASSIRPOUR et al. 1977) diagramok, nomogramok közlésével, míg egyesek már a modern kisérlettervezés módszereivel keresték az érdesség és az esztergáló megmunkálás paraméterei közötti kapcsolatot (PALÁSTI 1983), pl.: Ruzsov-Szuszlov-Federov által meghatározott összefüggés (2.36):

$$Ra = 5{,}8 \cdot v_c^{-0{,}15} \cdot f^{1{,}1} \cdot r_\varepsilon^{-0{,}68} \cdot (90+\gamma)^{0{,}45} \qquad (2.36)$$

PALÁSTI (1983) által felírt matematikai összefüggések:

$$Ra = 4{,}64 \cdot f^{0{,}78} \cdot r_\varepsilon^{-0{,}63} \cdot t_c^{0{,}23} \qquad (2.37)$$

$$Rm = 20{,}34 \cdot f^{0{,}66} \cdot r_\varepsilon^{0{,}52} \cdot t_c^{\,0{,}17} \qquad (2.38)$$

2.7. A szakirodalom összefoglalása, kritikai elemzése

Kutatási témám jellegéből adódóan a szakirodalom elemzése különböző tudományterületek együttes áttekintését igényelte. Ebben az esetben a kutatómunkám megalapozásához az áttekintett szakirodalmat három fő téma köré csoportosítottam:

- elsőként a felület minőségével kapcsolatos ismereteket foglaltam össze, különös tekintettel,
- a második részben felületi minőség jellemzésére alkalmazott mérési módszereket foglaltam össze, továbbá a 2D-s mikrogeometriai és a 3D-s mikrotopográfiai jellemzőket tekintettem át,
- végül a forgácsolási technológia és az érdesség közötti kapcsolatokat vizsgáló és a várható érdességet meghatározó irodalmakat foglaltam össze.

A 2D-s paraméterek alkalmazása a műszaki gyakorlatban a legelterjedtebb, közülük is elsősorban a magasságirányú paramétereket alkalmazzák a felületi minőség meghatározására (MAROS 2004, KAYAHAN et al. 2010). Miközben a mikrogeometriai jellemzőkkel számos esetben csak következtetni tudunk a valós térbeli felület mikrotopográfiai viszonyaira. A 3D-s paraméterek a műszaki felületek topográfiájának térbeli – a valós viszonyokat jobban tükröző – jellemzésére alkalmasak (PALÁSTI et al. 1998, FARKAS et al. 2005 a)). De, hogy mennyire hatékony e jellemzők alkalmazása, ennek tisztázására még számos

összehasonlító vizsgálatra van szükség, a hagyományos kétdimenziós párjukkal – amelyiknek van ilyen – összevetve. A működő felületek mikrotartományainak jellemzésére kialakult paraméterek még kevésbé ismertek, információtartalmuk pontos meghatározása nagyon fontos a gépalkatrészek működési viselkedésének egyre megbízhatóbb előrejelzéséhez, megítéléséhez (LEE et al. 2002, BENO et al. 2006, MANKOVA et al. 2006 PALÁSTI et al. 2006 a)).

A térbeli jellemzés egyrészt számszerű paraméterekkel, másrészt a felület képi feldolgozásával valósítható meg. A két módszer (pl. a metszettapintós és az elektronmikroszkópia) jól kiegészíti egymást és együtt alkalmasak a műszaki felületek sokoldalú háromdimenziós vizsgálatára, jellemzésére. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek készítésével, a vizsgálat tárgyát képező felületről olyan információkat kaphatunk, amelyekkel valóban sokrétűen jellemezhetjük azt. Ezzel közelebb kerülhetünk ahhoz a célhoz, amely a felületi mikrotopográfia minél nagyobb mértékű előre történő tervezhetőségét jelenti, és ezzel a különböző funkcionális tulajdonságú, különböző mikrotopográfiai jellegű felületek céltudatos, a működési követelményeknek minél nagyobb mértékben megfelelő előállítása válik lehetővé.

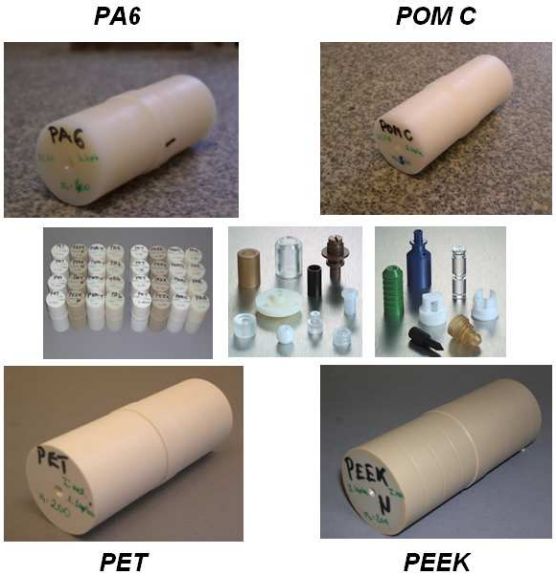
A forgácsolási paraméterek (forgácsolósebesség, előtolás, forgácsolási idő, szerszám csúcssugara, munkadarab keménysége) hatását az érdességi jellemzőkre számos kutatás vizsgálta (PALÁSTI 1983, ANGYAL et al. 1988, PALÁSTI et al. 2006 b), SIPOS et al. 2006, LIU et al. 2006). A forgácsolósebesség hatása az érdességre eltérő lehet attól függően, hogy a megmunkálás során keletkezik-e élrátét vagy sem. Élrátét képződés esetén a rendszertelen forgácsleválasztás következtében az érdesség jelentősen megnő. Ha a folyamatot nem kíséri élrátétképződés, akkor a forgácsoló sebesség növelése az átlagos érdesség csökkenését okozza. Az előtolás növelése *Ra* értékének növekedését idézi elő, a szerszám csúcssugarának növelésével az érdesség is nő. A forgácsolási idő (a szerszámkopás következtében) az érdességre általában növelő hatással van, a munkadarab keménysége az *Ra* csökkenését okozza. A technológiai paraméterek változásának hatása tehát a felületi érdességre összetett és a különböző forgácsoló megmunkálásoknál igen eltérő is lehet.

A várható érdesség fémek megmunkálásakor elméleti összefüggésekkel is meghatározható, amelyek alkalmazása a műszaki gyakorlatban általánosan elterjedt, bár a kis előtolás-tartományokban megengedhetetlen mértékű hibát okozhatnak. Ennek kiküszöbölésére a kutatók kísérleteken alapuló, tapasztalati összefüggéseket állítottak fel. Ezen képleteket elsősorban acélok esztergáló megmunkálására határozták meg és alkalmazták. Felmerül azonban az a kérdés, mennyire használhatóak ezek formulák műanyagok esztergálásakor a várható valós érdesség meghatározására, annak előrejelzésére.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Műszaki műanyagok

A műanyagok olyan szerves eredetű, műszaki eljárásokkal előállítható és feldolgozható, óriásmolekulájú anyagok, melyeket szintetikus vagy természetes óriásmolekulák átalakításával hoznak létre (PÉK 2000). A műanyagok évtizedek óta teljes értékű szerkezeti anyagok, melyeket a műszaki gyakorlat számos területen alkalmaz (CZIGÁNY et al 2003, DRÁGA 2003). BUZÁSI (2003) három részből álló cikksorozatában bemutatta, hogy az autógyártásban közel 10 %-ban használnak fel műanyagokat beltéri, kültéri és motortérbeli elemek előállításához. Az alkalmazott anyagtípusok között szerepelnek többek kötött a poliamidok és a poliacetálok (BUZÁSI 2003). A műanyagok gyártása és felhasználása a világon és Magyarországon folyamatosan növekszik, de természetesen ez a változás anyagtípusonként és országonként eltérő (SZABÓ 2003). A műanyagok előállításához és feldolgozásához kapcsolódó technológiai eljárások – alkalmazási területük folyamatos szélesedésével – napról napra nagymértékben fejlődnek.



3.1. ábra A kísérletekhez választott műszaki műanyagok

A műanyagok alapvetően két csoportba sorolhatók hővel szembeni viselkedésük alapján, lehetnek hőre lágyuló és hőre nem lágyuló műanyagok. A szakirodalom további két típust is megkülönböztet (KALÁCSKA 2005):

- általános rendeltetésű műszaki műanyagok, ide tartoznak a poliamidok (PA), a poli-oxi-metilének (POM), a polietiléntereftalátok (PET), valamint az ultranagy molekulatömegű polietilének (UHMW-PE) stb.,
- nagy teljesítményű műszaki műanyagok, melyek közé soroljuk többek között a poliéter-éter-ketont (PEEK), a polifenilszulfidot (PPS), a polivinildénfluoridot (PVDF), a poliimidet (PI) stb.

A kutatási munkában a műszaki műanyagok széles választékából négy kristályos szerkezetű hőre lágyuló polimert választottam ki (3.1. ábra). A következőkben ezeket ismertetem.

Öntött poliamid 6 (PA6) [-NH-(CH$_2$)$_5$-CO-]$_n$

Poliamidok számos fajtája létezik, amelyek közötti különbség abból adódik, hogy hány szénatom van az alapszerkezetben a nitrogénatomok között. Az öntött poliamid 6 általános rendeltetésű műszaki műanyag, melyet 1938-ban fejlesztettek ki kaprolaktámból Németországban. Jó mechanikai szilárdság (R_m = 70-110 MPa), jó kopásállóság és csúszási tulajdonság (μ = 0,15-0,5) jellemzi. Hőállósága a feldolgozhatóság szempontjából megfelelő (-40 C-tól +140 °C) (ANTAL at al. 1997). Jellegzetes tulajdonsága a viszonylag magas vízfelvevő képesség, ezért a forgácsoló megmunkálás alatt levegőhűtés alkalmazása előnyösebb (SOUTHARD 2001). A forgácsolási teljesítmény szempontjából jól forgácsolható közepes és nagy forgácsolási sebességgel és kis előtolással. A változatos molekulaszerkezet miatt széles felhasználási terület jellemzi: csapágyperselyek, támcsapágyak, vezeték és kopólécek, tartó-, feszítő-, vezető-, szállítógörgők, kötélcsigák, kötélcsigaperselyek, bütykök, ütközők, kalapácsfejek, lehúzók, fogaskerekek, fogaslécek, lánckerekek, szállítócsigák, szállítóelemek, tömítőgyűrűk, szigetelőelemek, vágólapok stb. (KALÁCSKA 2005). A poliamidok alkalmasak társító- és erősítőanyagokkal kombinálva kompozitanyagok létrehozására. A poliamidba adalékolt kenőanyagok kedvezően befolyásolják a siklócsapágy tribológiai viselkedését, mely a felhasználhatóságát is segítik. (KOZMA et al. 2004.)

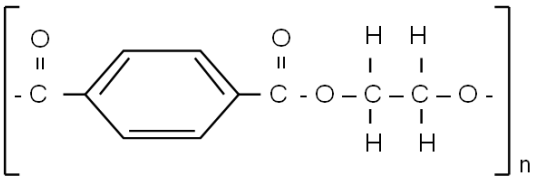
Poli(oxi-metilén) (POM C)

Poli(oxi-metilén) általános rendeltetésű műszaki műanyag, amely formaldehid vagy nagyobb szénatomszámú aldehidek homo- és kopolimerje. Nagyfokú méretstabilitással rendelkezik, szívós, kemény, merev anyag. Nagy szilárdság (R_m = 70-80 MPa), nagy keménység (Rockwell: M 86 – M 90) jellemzi, nedvesség hatására nem duzzad. Széles alkalmazási hőmérséklet-tartománya (-50 C-tól + 120 °C) és jó csúszási tulajdonsága (μ = 0,25-0,45) miatt széles körben alkalmazott műszaki műanyag (FÜZES et al. 1989). Forgácsolással könnyen megmunkálható, de a megmunkálás alatt a forgácsot gyorsan el kell távolítani. Főbb alkalmazási

területei: mérettartó precíziós alkatrészek, kis modulú fogaskerekek, szelepülékek, rugók, csúszóelemek, vezérlő bütykök, görgők, kötőelemek.

Poli(etilén-tereftalát) (PET)

Poli(etilén-tereftalát) általános rendeltetésű műszaki műanyag, melyet tereftálsav és etilénglikol polikondenzációjával hoztak létre (3.2. ábra). Az 1940-es években állították elő, mára a felhasználása olyan nagy volumenű és széleskörű, hogy nemcsak műszaki műanyagnak, hanem tömeg műanyagnak is számít (VARGHA 2004). Nagy hőállóság (-20 C-tól + 115 °C), nagy mechanikai szilárdság (R_m = 78-90 MPa), jó csúszási tulajdonság (μ = 0,1-0,3) jellemzi (FÜZES et al. 1989). A jó mérettartása és az alacsony hőtágulási együtthatója a megmunkálhatóságát, az alacsony vízfelvevő képessége és vegyszerállósága a széleskörű alkalmazhatóságát biztosítja (ANTAL et al. 1997).

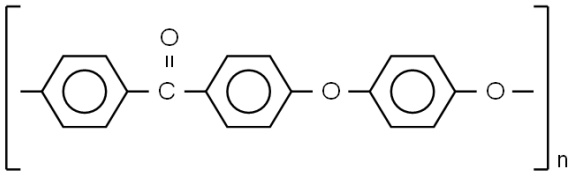


3.2. ábra A poli(etilén-tereftalát) molekulaszerkezete (ANTAL et al. 1997)

Jellemző alkalmazási területei: nagy terhelésű csúszóelemek, csapágyperselyek, támcsapágyak, mérettartó finommechanikai alkatrészek, perselyek, kopólécek, kismodulú fogaskerekek, görgők, elosztó dugattyúk az élelmiszeriparban, vezérlőbütykök, szivattyúelemek, elektrotechnikai szigetelőelemek (KALÁCSKA 2005).

Poli(éter-éter-keton) (PEEK)

Poli(éter-éter-keton) nagy teljesítményű műszaki műanyagok közé tartozik, mely részben kristályos szerkezetű extrúzióval előállított féltermék, anyaga lineáris aromás polimerláncokból áll (3.3. ábra).



3.3. ábra A poli(éter-éter-keton) molekulaszerkezete (ANTAL et al. 1997)

Néhány évtizedes múltra visszatekintő anyagtípus, amely kedvező tulajdonságai miatt erős kopásnak kitett vagy tartósan magas üzemi hőmérsékletű alkalmazásokban előszeretettel választják (KÓNYA 2005).

Kiváló hőállóság (250 ºC - 310 ºC), magas olvadáspont (340 ºC) és mechanikai szilárdság (R_m = 75-130 MPa), továbbá nagy merevség jellemzi. KÓNYA és munkatársainak (2004) munkájában a PEEK kopását vizsgálta és a kísérleti eredményekből megállapította, hogy szobahőmérsékleten csak hosszabb idő után érzékelhető a kúszás hatása, de magasabb hőmérsékleten (150 ºC) már jelentős szerepe van. A lágy acélokhoz hasonló körülmények között jól forgácsolható. Magas hőállósága miatt pedig a járműtechnikában is alkalmazható (SOUTHARD 2001). Főbb alkalmazási területei: fogaskerekek, szivattyúelemek, tömítések, szelepülékek, csúszóelemek, elosztódugattyúk, készülékelemek gépiparban, gyógyászati eszközgyártásban (KALÁCSKA 2005, KOZMA 1997).

3.2. Műszaki műanyagok megmunkálása forgácsolással

A korszerű termékek fejlesztésekor nem hagyhatók figyelmen kívül azok a szerkezeti anyagok, amelyek szilárdsági és hőfizikai tulajdonságaikkal, valamint kis sűrűségükkel tűnnek ki (KALÁCSKA et al. 2007). Ilyen anyagok többek között a műanyagok is, amelyek elterjedésével egyre jobban kell számolniuk a tervezőknek. A gyakorlatban felhasznált műanyagoknak egy sor követelményt kell kielégíteniük:

- károsodás nélkül feldolgozhatóknak kell lenniük;
- a felhasználás során tulajdonságaikat hosszú időn át képesek legyenek megőrizni;
- mechanikai, termikus és egyéb tulajdonságaikat az adott igénynek megfelelően lehessen alakítani, stb..

A műanyagok elsődleges alakadása kétségkívül a melegalakítás (fröccsöntés, extrudálás, stb.), azonban másodlagos folyamatként – különösön bonyolult alakzatokat tartalmazó, pontos alkatrészeknél – a forgácsolásnak is fontos szerep jut. A szakirodalmakban néhány utalás található a különféle műanyaféleségek forgácsolási körülményeire (SANDER 1989, FÜZES et al 1989, SAGDIC 2002, KALÁCSKA 2005, PALANIKUMAR et al. 2008, QUADRINI et al. 2007). A közölt irodalmakat tanulmányozva az állapítható meg, hogy mindegyik műanyag félkész terméket előállító (vagy forgalmazó) cég nagyon tág határok közé eső forgácsolási adatokat ajánl az egyes műanyagok forgácsolásához.

A műanyagok *forgácsolását* általánosságban a következő körülmények befolyásolják (SIPOS 2006):

- Egyes műanyagok hőmérséklet okozta méretváltozása tízszer nagyobb, mint a fémeké.
- A műanyag rossz hővezető a fémhez képest, ezért a helyi felhevítéstől meg kell óvni, ilyen esetben a megmunkálás során hűtést kell alkalmazni.
- Lágyulási (olvadás) hőmérséklete sokkal kisebb a fémekhez viszonyítva. Bár a műanyagok forgácsolásakor általában nem használnak hűtő-kenő folyadékot, azonban kis tűrések tartásakor vagy minimális érdesség elérése céljából nem aromás olajból készített emulzió megfelelő. Ködhűtést vagy sűrített levegőt szoktak alkalmazni a forgács-szerszám érintkezésénél. Petróleum alapú általános hűtőfolyadék sok fémnél és műanyagnál is felhasználható, amennyiben a forgácsképződést javítja (egyes műanyagoknál elősegíti).
- A műanyag sokkal rugalmasabb, mint általában a fémek, ezért a mérettartás (és mérettűrés tartása) is nehezebb.
- Az élrátét csökkenhető és a forgácsolt felület érdessége javítható finoman köszörült hátfelületű és fenéssel tükrösített homloklapú szerszámok alkalmazásával.
- Az esztergálási munkákhoz finomszemcsés keményfémlapka használata a legcélszerűbb megfelelően nagy hátszög alkalmazásával.
- Megfelelően megtámasztott munkadarab korlátozza a szerszám lehajlását.

Optimális eredmény csak a befogás, a szerszámanyag, az élgeometria és a forgácsolási adatok együttes és helyes megválasztásától várható (KALÁCSKA et al. 2007).

A Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet által folytatott régebbi vizsgálatokból poliamid (PA6) alkatrészek forgácsolási tapasztalatai állnak rendelkezése. Ezek alapján az említett műanyag esztergálásakor a következő körülményeket célszerű betartani (SIPOS 2006, GULYÁS 1984):

- A hátfelületen és a homlokfelületen rendkívül finoman kell élezni, a megélezett lapka élének nagyon kis lekerekítésűnek kell lennie.

- A forgácsoló él érdességét befolyásoló tényezők megválasztásánál figyelemmel kell lenni a következő szempontokra:

  - A köszörült felületek érdességét gyémántpasztás fenéssel hozzuk a kívánt mértékűre.

- Az élezési irány megválasztásánál kerülendő az élre merőleges irány alkalmazása. Tilos az „élre történő élezés” gyakorlata, mert ez az esetek többségében élsorja kialakulását eredményezi. Az él sorjásodása azért is kerülendő, mert annak meggyengült szerkezete a fogásbelépés első pillanataiban zavarokat okoz. Műanyag forgácsolásnál – a kedvezőtlen hőfizikai tulajdonságok következtében – viszonylag nagy hőmérsékletek alakulnak ki, ami az él meggyengült felső anyagrétegeinek károsodását okozza.
- A helyes élezési irány az éllel párhuzamos.
- A megfelelően kialakított (tehát növelt) hátszög és homlokszög - sajnálatos módon - az él érdességének növekedését okozza.
- A tartós forgácsolásnál a szerszám eléletlenedését az élkopás okozza. A forgácsolás nem végezhető el „tompa” élű szerszámmal. Az éltartamkritériumot a forgácsolt felületek homogén állapota jelzi: ha az éllekerekedés egy meghatározott mértéket elér, a forgácsolt felület „tépett” lesz, és az esztergálást be kell fejezni.

Az elvégzett kísérletek eredményei elsősorban a megmunkálás körülményeinek meghatározására irányultak. Mindemellett fontos szempontként jelentek meg a műszaki gyakorlatban a megmunkált felület geometriai minőségével kapcsolatos követelmények, melyek által a technológiai paraméterek meghatározását új szemszögből kell megközelíteni.

3.3. A kutatásban alkalmazott műszaki műanyagok forgácsolási paraméterei

Öntött poliamid 6 (PA6)

Poliamid nagyon lágy termoplasztok közé tartozik, melynek jellegzetessége a nagy nedvességfelvétel, ezért a forgácsoló megmunkálása során nagy figyelmet kell szentelni a munkadarab túlmelegedésének elkerülésére (hűtés körülményeinek kialakítására) és a forgácsolási paraméterek megválasztására, mivel a nem megfelelő megmunkálási körülmények növelhetik a hőterhelést (pl. a túl kicsi előtolás, a nem kellően élezett szerszám).
A szakirodalom javaslatai alapján a poliamid esztergálási paramétereit a 3.1. táblázatban foglaltam össze.
A megmunkáláshoz alkalmazott szerszám a poliamid 6 műanyagra a hagyományos fém (szénacél, gyorsacél, keményfém), bizonyos esetekben famegmunkáló szerszámok közül választhatók (KALÁCSKA 2005, SAGDIC et al. 2002). Közepes forgácsoló sebesség (v_c = 200-300 m/min) valamint kis és közepes előtolás (f = 0,1-0,5 mm/ford) értékek javasoltak a poliamid 6 esztergálására.

3.1. táblázat Poliamidok esztergálási paraméterei (FÜZES et al. 1989, KALÁCSKA 2005)

	Javasolt értékek
Szerszám geometria	
Főélelhelyezési szög, κ_r [˚]	45-60
Hátszög, α_0 [˚]	6-10
Homlokszög, γ [˚]	0-5
Esztergálási paraméterek	
Forgácsoló sebesség, v_c [m/min]	250-300
Előtolás, f [mm/ford]	0,1-0,5
Fogásmélység, a [mm]	0,1-2,5

Poli(oxi-metilén) (POM C)

Poli(oxi-metilén) az egyik legkedveltebb anyagtípus a forgácsolás szempontjából. Jól esztergálható, kedvező forgácsleválasztás jellemzi többnyire fonalszerű forgácsalakkal. Az irodalomban talált megmunkálási paramétereket a 3.2. táblázat foglalja össze, látható, hogy viszonylag nagy forgácsoló sebesség javasolt a POM C esztergálásánál, de az értéke igen tág határok között választható meg, a fogásmélységnél pedig akár 25-szörös értékkülönbség is adódhat. Az alkalmazott szerszám hasonló geometriai kialakítású kés lehet, mint a kutatási munkámban alkalmazott többi műanyagféleségnél (PA 6, PET, PEEK).

3.2. táblázat Poli(oxi-metilén) esztergálási paraméterei (FÜZES et al. 1989, KALÁCSKA 2005)

	Javasolt értékek
Szerszám geometria	
Főélelhelyezési szög, κ_r [˚]	45-60
Hátszög, α_0 [˚]	6-8
Homlokszög, γ [˚]	0-8
Esztergálási paraméterek	
Forgácsoló sebesség, v_c [m/min]	300-600
Előtolás, f [mm/ford]	0,1-0,4
Fogásmélység, a [mm]	0,1-2,5

Poli(etilén-tereftalát) (PET)

Poli(etilén-tereftalát) műszaki műanyagra javasolt esztergálási paramétereket tartalmazza 3.3. táblázat. Jól forgácsolható, de a megmunkálás során közepes és nagy forgácsoló sebességet (v_c = 300-400 m/min) és kis előtolást (f = 0,2-0,4 mm/ford) kell alkalmazni. A fogásmélység 0,6 mm-től akár 3,8 mm-ig választható az esztergálás során.

3.3. táblázat Poli(etilén-tereftalát) esztergálási paraméterei (FÜZES et al. 1989, KALÁCSKA 2005)

	Javasolt értékek
Szerszám geometria	
Főélelhelyezési szög, κ_r [˚]	45-60
Hátszög, α_0 [˚]	5-10
Homlokszög, γ [˚]	0-5
Esztergálási paraméterek	
Forgácsolási sebesség, v_c [m/min]	300-400
Előtolás, f [mm/ford]	0,2-0,4
Fogásmélység, a [mm]	0,6-3,8

Poli(éter-éter-keton) (PEEK)

Poli(éter-éter-keton) kitűnő hőfizikai és mechanikai tulajdonságai miatt a forgácsolás tekintetében a lágy acélok hasonlít. Esztergálásakor nagy forgácsoló sebességet és kis előtolást kell alkalmazni a 3.4. táblázat szerint.

3.4. táblázat Poli(éter-éterketon) esztergálási paraméterei (FÜZES et al. 1989, KALÁCSKA 2005)

	Javasolt értékek
Szerszám geometria	
Főélelhelyezési szög, κ_r [˚]	45-60
Hátszög, α_0 [˚]	6-8
Homlokszög, γ [˚]	0-5
Esztergálási paraméterek	
Forgácsolási sebesség, v_c [m/min]	250-500
Előtolás, f [mm/ford]	0,1-0,5
Fogásmélység, a [mm]	0,6-3,8

A fogásmélység viszonylag széles tartományban választható 0,6 és 3,8 mm között. Az alkalmazott szerszám a PEEK megmunkálására ennek ellenére a hagyományos fém (szénacél, gyorsacél, keményfém, gyémánt), bizonyos esetekben famegmunkáló szerszámok közül választhatók (KALÁCSKA 2005, SAGDIC et al. 2002), hasonlóan az előzőekben bemutatott műanyagféleségeknél (PA 6, POM C, PET).

Összefoglalva, ebben az alfejezetben ismertettem a kutatási munkámban alkalmazott műszaki műanyagokat, azok tulajdonságait és jellegzetes felhasználási területeit. Számos tanulmány foglalkozik a műszaki műanyagok előállításával, gyártástechnológiájával valamint a különböző területeken történő felhasználásával. Alkalmazásuk igen elterjedt, szinte valamennyi iparágban megtalálhatók (PÉK 2000, CZIGÁNY et al. 2003, DRÁGA 2003, BUZÁSI 2003).

Fém/polimer csúszópár kopási vizsgálatával szintén több kutatási munka is foglalkozik, amelyek a műanyagok tribológiai tulajdonságait vizsgálják különböző felhasználási területeken (KOZMA 1997, KOZMA et al. 2005, KÓNYA et al. 2004). Értékes tapasztalatok nyerhetők ezen vizsgálatokból, amelyek a műszaki műanyagok felhasználása során, működése közbeni viselkedését, jellemző tulajdonságait térképezik fel. A műanyagok gyártástechnológiájával, azon belül is elsősorban a félkész- illetve késztermékek esztergálással történő megmunkálásával viszont már kevesebb tanulmány foglalkozik (GULYÁS 1984, SANDER 1989, KALÁCSKA 2005, SIPOS 2006,). A szerszám geometriájára vonatkozó jellemzőket, valamint az esztergálási paramétereket igen általánosan és viszonylag széles tartományban határozzák meg. Ezen jellemzők pontosítása, leszűkítése a felületi minőség tekintetében és az egyes műanyagtípusok forgácsolási paramétereinek meghatározására még nem kellően kidolgozott.

3.4. A kísérletek helyszínei, gépek és eszközök

Ebben a részben a forgácsolási kísérletekhez és a megmunkált felületek mikrotopográfiai vizsgálatokhoz kapcsolódó kutatási céljaim megvalósításában szerepet játszó körülményeket (módszereket, eszközöket) ismertetem részletesen.
Az 1.2. fejezetben megfogalmazott célkitűzések megvalósításához szükséges forgácsolási kísérleteket az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet Gépműhelyében végeztem el. A megmunkált felületek 2D-s és a 3D-s érdességi vizsgálatait az Intézet topográfiai méréstechnikai laboratóriumában készítettem.

3.4.1. A forgácsolási kísérletnél alkalmazott szerszámgép

A forgácsolási megmunkálást NCT EUROTURN 12B CNC-vezérlésű HSC-esztergán végeztem el (3.4. ábra), melyet az Intézet 2004-ben vásárolt. A

szerszámgép a kísérleteim elvégzéséhez jól illeszkedett, állapota még kiválónak minősíthető.

3.4. ábra NCT EUROTURN 12B CNC-vezérlésű HSC eszterga

Az ellenorsós, hajtott szerszámozású CNC esztergagép főbb jellemzőit a 3.5. táblázatban foglaltam össze. Az esztergagép felépítése alkalmas volt arra, hogy a megmunkálást biztonságosan és folyamatosan figyelemmel kísérjem és videó felvételeket készítsek, amelyek az elemzéseknél nagy segítséget nyújtottak számomra. A tokmányt az d_{md} = Ø 40 mm próbadarabok befogására szabályoztam fel. A CNC-program megírásánál messzemenőkig figyelembe vettem a kísérleti jelleget, így a különböző adatkombinációk lefuttatása után mindig lehetőség volt a forgácsgyűjtésre, illetve a váratlan események elhárítására (pl. forgács megszorulás, szerszámcsorbulás, stb.).

3.5. táblázat NCT EUROTURN 12B CNC-vezérlésű HSC eszterga műszaki adatai

Teljesítmény [kW]	**7**
Főorsó fordulatszám tartománya [ford/min]	**0-6000**
Maximális esztergálható átmérő [mm]	**120**
Maximális esztergálható hossz [mm]	**195**
Legnagyobb elforduló átmérő az ágy fölött [mm]	**310**
Legnagyobb elforduló átmérő a keresztszán fölött [mm]	**120**
Csúcstávolság [mm]	**300**
Ajánlott tokmányátmérő [mm]	**160**
Szerszámváltó típusa	**SAUTER revolverfej**
Szerszámhelyek száma	**8**

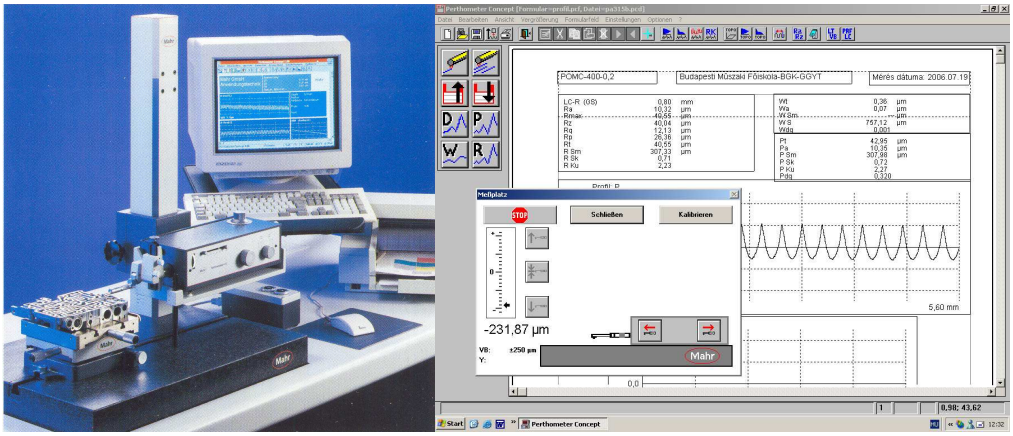
3.4.2. A felületi érdesség mérésének körülményei

A forgácsolt munkadarabokat előzetes vizsgálatnak vetettem alá. A felületeket Perthometer C3A műhelyi érdességmérő készülékkel (3.5. ábra) mértem meg. A

műszer alkalmas az *Ra*, *Rz*, *Rt* jellemző számszerű kijelzésére és profilgörbe előállítására. Analóg kimeneti jele A/D átalakítón keresztül közvetlenül is alkalmas az adatok számítógépes feldolgozására.

3.5. ábra C3A műhelyi érdességmérő készülékkel (PERTHOMETER C3A 2003)

A megmunkált felületek 2D-s és a 3D-s érdességi vizsgálatait a Mahr Perthometer-Concept típusú tapintófejes műszerrel (3.6. ábra) végeztem az Intézet méréstechnikai laboratóriumában. A mérésekhez a megmunkált felületekről készült mérési eredményeket mérési jegyzőkönyvben rögzítettem, melyet az M3. melléklet tartalmaz.



3.6. ábra Mahr Perthen Concept típusú metszettapintós érdességmérő (MAHR 1998)

A felületek kiértékelésénél alkalmazott beállítások az ISO 4288:1996 szabvány szerint:
- kiértékelési hossz, l_m = 4 mm;
- az előírt szűrő, l_c = 0,8 mm.

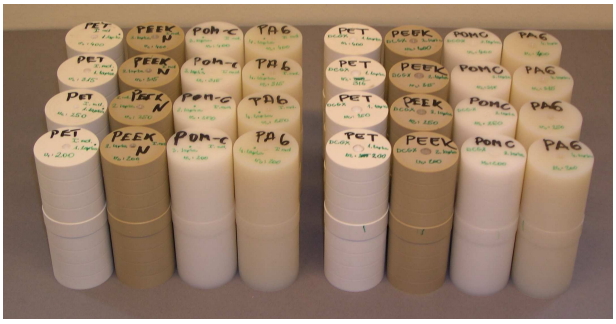
A mérések során felvett profilok és paraméterek:
- a szűretlen (*P*) profil;
- a szűrt érdességi (*R*) profil;
- 9 érdességi paraméter: *Ra*, *Rmax*, *Rz*, *Rq*, *Rp*, *Rt*, *RSm*, *RSk*, *RKu*;
- 5 hullámossági paraméter: *Wt*, *Wa*, *WSm*, *WS*, *Wdq*;
- 6 szűretlen paraméter: *Pt*, *Pa*, *PSm*, *PSk*, *PKu*, *Pdq*.

A méréseket a Mahr RHT 3/50e és a Mahr BFRW 750 típusú tapintóval végeztem a megmunkálási irányra merőlegesen. A választott tapintók alkalmasak voltak a kutatásban alkalmazott műanyagok felületi textúrájának mérésére, a mérés során a felületet nem sértették meg, nem okoztak karcolást vagy egyéb hibát.
A 3D-s paraméterek a vizsgált terület 2 x 2 mm-es részéről készültek. A mérés során a topográfiai kép kialakítása – a mintavételi felület letapogatása során – egymástól meghatározott távolságra lévő profilmetszetek (jelen esetben 501) létrehozásával történik, a szabványnak megfelelő mérési hosszon és előírt szűrő alkalmazásával.

A PEEK műszaki műanyag esztergált felületeiről a JEOL JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket az Intézet Anyag és Alakítástechnológiai Szakcsoport laboratóriumában készítettem.

3.5. A kísérletek során alkalmazott anyagok

A kísérletek anyagául négy hőre lágyuló műszaki műanyagot választottam ki, ezek az öntött poliamid 6, PA6; a poli(oxi-metilén), POM C; a poli(etilén-tereftalát), PET és a poli(éter-éter-keton), PEEK (3.7. ábra).

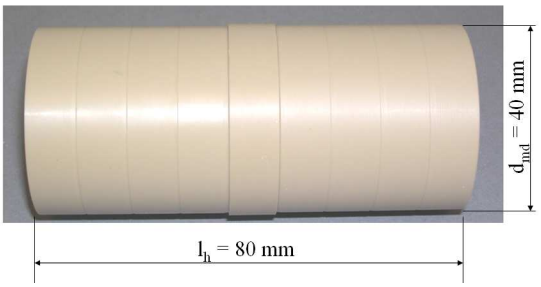


3.7. ábra A kísérletekhez használt műszaki műanyagok

A műszaki műanyag féltermékekből forgácsolással előállított gépelemek esetén az az érdekesség figyelhető meg, hogy a molekulaszerkezet függvényében – azonos forgácsolási paraméterek esetén is – jelentősen eltérhet a kapott felület minősége és méretpontossága (FARKAS et al. 2005, KALÁCSKA et al. 2006). Ezért mindenképpen indokolt a jelentősen eltérő molekulaszerkezetű polimerek külön vizsgálata és kutatása a forgácsolás optimálása érdekében.

3.6. A forgácsolási kísérletek

A forgácsolási kísérletek megkezdése előtt a rendelkezésre álló Ø40x1000 mm méretű rudakból l_h = 80 mm hosszúságú próbadarabokat készítettem úgy, hogy azok mindkét végén befoghatók legyenek (3.8. ábra). Így egy próbatestet kétszer befogva 4 – 4 különböző beállításhoz lehetett használni.



3.8. ábra A kísérletekhez használt munkadarabok

Az alkalmazott szerszámokat használat előtt és után is élvizsgálatnak vetettem alá, melynek eredményeit és értékelését a 3.6.2. fejezetben ismertetem.

3.6.1. Az esztergálás választott paraméterei

Az egyes kísérleti beállítások forgácsolási adatkombinációit, valamint az alkalmazott esztergakéseket, a szakirodalom javaslatait figyelembe véve választottam ki.

A kísérletekhez négyféle forgácsoló sebességet alkalmaztam, az esztergálást egy nagyolási és egy simítási fázisra bontva végeztem el (3.6. táblázat).

A megvalósított kísérleti beállítások a következők voltak:

- forgácsoló sebesség, v_c = 200; 250; 315; 400 m/min,
- előtolás a simítási fázisban, f = 0,05; 0,08; 0,12; 0,16 mm/ford,
- előtolás a nagyolási fázisban, f = 0,2; 0,25; 0,315; 0,4 mm/ford,
- fogásmélység, a = 0,5 mm (állandó érték),
- munkadarab méretei: d_{md} = Ø 40 mm
  l_{md} = 80 mm,
- hűtést a megmunkálás során nem alkalmaztam.

3.6. táblázat A kísérletek során alkalmazott forgácsolási paraméter kombinációk

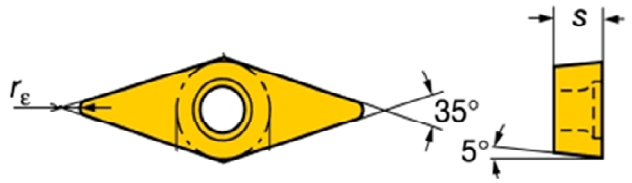
Kísérleti beállítás	**1**		**2**		**3**		**4**	
v_c [m/min]	200		250		315		400	
a [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
f [mm/ford]	0,05 0,08 0,12 0,16	0,2 0,25 0,315 0,4	0,05 0,08 0,12 0,16	0,2 0,25 0,315 0,4	0,05 0,08 0,12 0,16	0,2 0,25 0,315 0,4	0,05 0,08 0,12 0,16	0,2 0,25 0,315 0,4

A forgácsolási kísérletek megkezdése előtt az összes olyan paramétert és körülményt számba vettem, amelyek a kísérletben szerepeltek. Minden esztergálási műveletről videó felvételt készítettem a műanyagok forgácsolás alatti viselkedésének elemzéséhez (3.9. ábra), továbbá a keletkező forgácsokat összegyűjtöttem forgácstabló formájában a forgácsalak további vizsgálatához, melyet az M5. M6. M7. mellékletekben mutatok be.

3.9. ábra A munkadarab megmunkálása közben készített felvételek

3.6.2. Az alkalmazott szerszámok

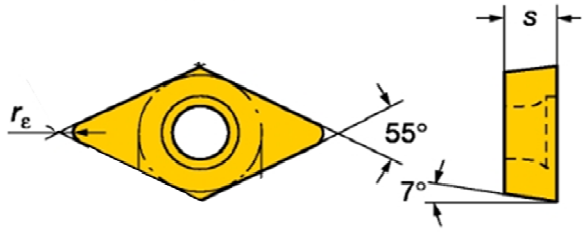
A 3.3. fejezetben leírtak szerint a forgácsolószerszámok kiválasztásánál maximálisan figyelembe vettem a szakirodalmi javaslatokat. Ez alapján a kereskedelmi forgalomban kapható alumínium megmunkálásra alkalmas lapkák közül választottam ki a forgácsolási kísérletekhez alkalmazott lapkákat. Mindegyik lapkatípusból 4-4 db. használtam fel, tehát mindegyik műszaki műanyagtípus forgácsolásánál új lapkát alkalmaztam (SIPOS 2006).



3.10. ábra Forgácsolószerszám geometriája „A” lapka (SANDVIK 2009)

„A” jelölésű lapka geometriai jellemzői (VCGX 110204-AL/H10) (3.10. ábra):

- csúcsszög: $\varepsilon_r = 35^\circ$
- hátszög: $\alpha_0 = 5^\circ$
- csúcssugár: $r_\varepsilon = 0{,}4$ mm
- lapkavastagság: $s = \sim 2{,}4$ mm



3.11. ábra Forgácsolószerszám geometriája „B” lapka (SANDVIK 2009)

„B” jelölésű lapka geometriai jellemzői (DCGX 11T304-AL/H10) (3.11. ábra):

- csúcsszög: $\varepsilon_r = 55^\circ$
- hátszög: $\alpha_0 = 7^\circ$
- csúcssugár: $r_\varepsilon = 0{,}4$ mm
- lapkavastagság: $s = \sim 3{,}9$ mm

Az élállapot kísérletek előtti ellenőrzése egyrészt a tesztelt lapkák minőségi eltéréseire ad felvilágosítást, illetőleg a forgácsolás közbeni viselkedésére következtethetünk belőle.

3.7. táblázat „A” lapka mérési eredményei

Vizsgált jellemzők	A1 lapka		A2 lapka		A3 lapka		A4 lapka		Mérési eredmények átlaga, szórása
	1. él	2. él	1. él	2. él	1. él	2. él	1. él	2. él	
Éllekerekedés, r_n [μm]	20	19	22	15	10	10	8	9	14,1 ± 5,6
Élérdesség, *Ra* [μm]	1,24	1,17	1,18	1,34	1,58	1,45	1,25	1,16	1,29 ± 0,15
Élérdesség, *Rz* [μm]	6,6	6,48	6,18	6,89	7,17	7,0	5,66	5,47	6,43 ± 0,62

Az „A” lapkák minősége sajnos nem a várt jellemzőket adta (3.7. táblázat). A mért éllekerekedés meglepően nagy szórás, az él érdességi paramétereiben pedig közel 50%-os eltérés mutatkozott. Az *Ra* értéke 1,29 μm körül alakult, az *Rz* értéke pedig 6,43 μm. Élgeometriai szempontból a 4. lapka bizonyult a legjobbnak (*Ra* =1,16 μm, *Rz* = 5,47 μm), a többi lapka csak átlagos minőségű volt.

3.8. táblázat „B” lapka mérési eredményei

Vizsgált jellemzők	B1 lapka	B2 lapka	B3 lapka	B4 lapka	Mérési eredmények átlaga, szórása
	1. él	1. él	1. él	1. él	
Éllekerekedés, r_n [μm]	6	7	6	8	6,75 ± 0,96
Élérdesség, *Ra* [μm]	0,59	0,55	0,56	0,61	0,58 ± 0,03
Élérdesség, *Rz* [μm]	2,87	2,47	2,56	2,74	2,66 ± 0,18

A „B” lapkák előzetes éllekerekedés és élérdesség vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy a lapkákat szabatos él, nagyon kis lekerekedés jellemezte, ráadásul – a szakszerű élfenés eredményeként – minimális érdesség szórással rendelkeztek (3.8. táblázat). Az átlagos érdesség értéke *Ra* =0,58 μm, míg az egyenetlenség magasság értéke *Rz* =2,66 μm körül alakult kis szórással, tehát a nagyobb csúcsszögű lapkák igen jó minőségűek voltak.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Az elméleti érdesség vizsgálata esztergált műszaki műanyagoknál

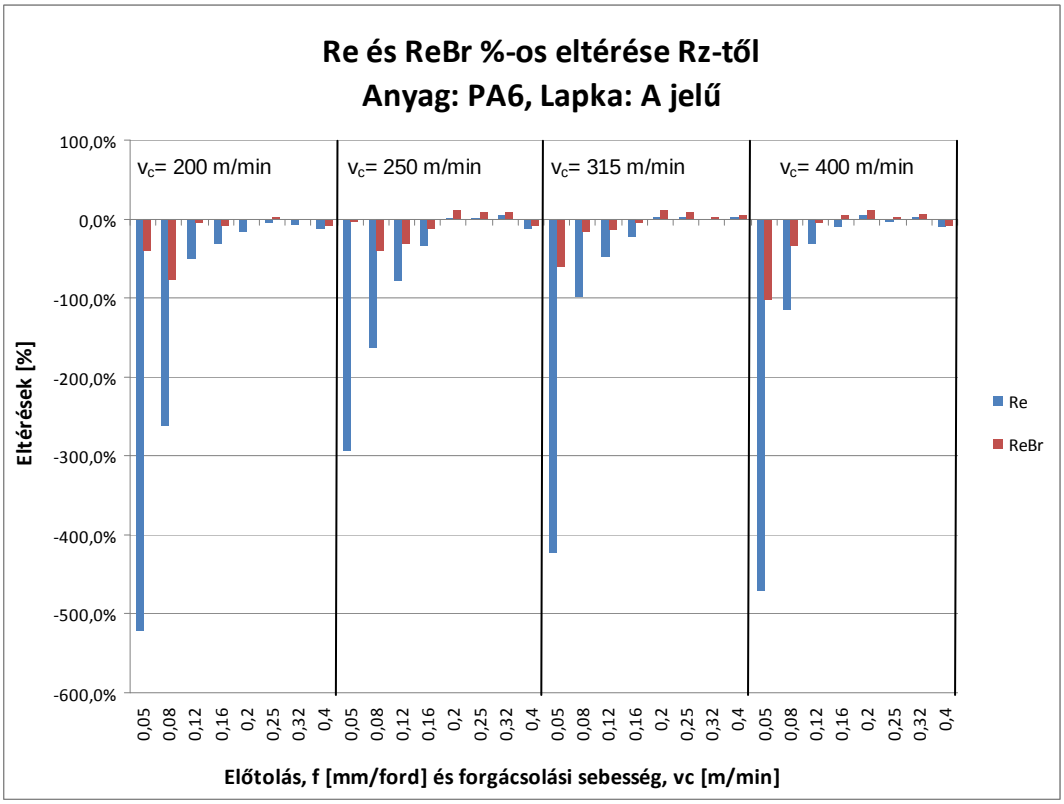
Az optimális forgácsolási paraméterek a műanyagok egyes típusainál a felületi érdesség vonatkozásában még nem pontosan meghatározottak. A vizsgálatokkal a célom az volt, hogy megállapítsam a megmunkálási paraméterek (v_c, f) hatását az érdességi profil legjellemzőbbnek tartott paramétereire (Ra, Rz), azaz az $Ra = Ra(v_c;f)$ és az $Rz = Rz(v_c;f)$ kapcsolatot kerestem.

Kísérletekkel célom az volt, hogy megvizsgáljam, a műanyagok forgácsolása mennyiben tér el az acéloknál tapasztaltaktól, továbbá a mért egyenetlenség magasság (Rz) értéke hogyan alakul a számított, elméleti érdességhez (Re) képest az előtolás függvényében. (FARKAS et al. 2007 a))

A forgácsolás során az előtolás hatásának vizsgálatát a felületi érdességre R-f diagramok tartalmazzák (M8. melléklet). Ebben a fejezetben bemutatott diagramok a várható elméleti érdességek – a Bauer-féle összefüggés (Re) és a Brammertz-féle formula (Re_{Br}) – a valóságos, mért érdességtől (Rz) való eltéréseit mutatják %-ban.

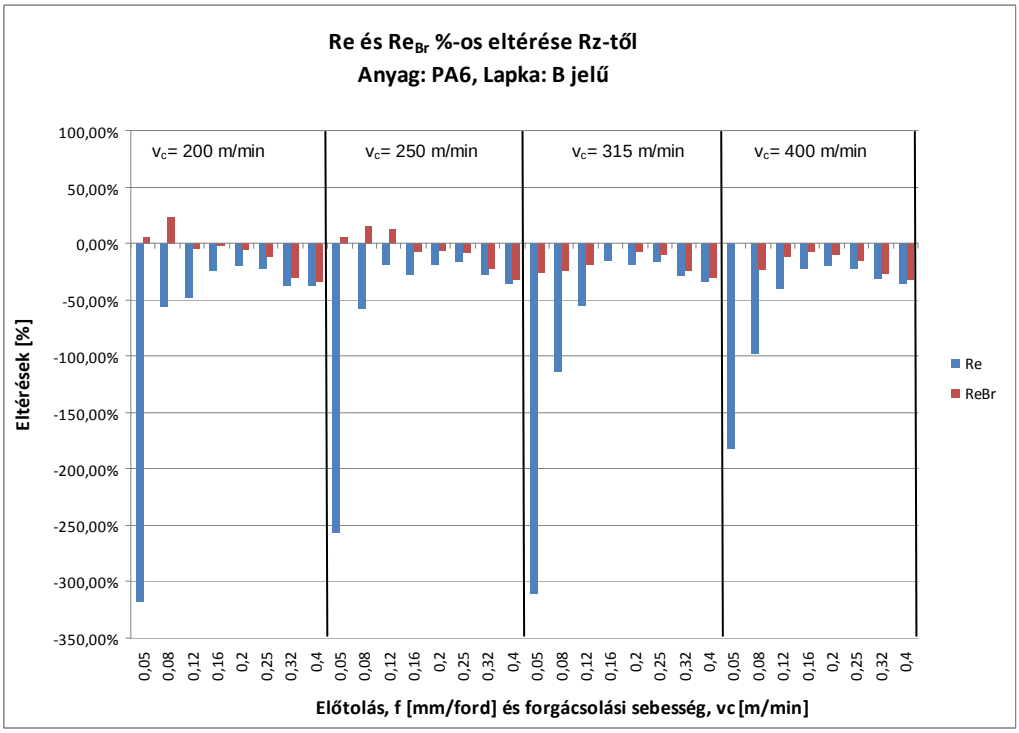
4.1.1. Az elméleti érdesség vizsgálata öntött poliamid 6 esetén

Az öntött poliamid 6 forgácsolása („A” típusú lapkával) során kis előtolásoknál (f = 0,05-0,16 mm/ford) gyakran bizonytalan volt a forgácsleválasztás. A 4.1. ábra diagramjából is látható, hogy a mért érdesség (Rz) az elméleti érdesség (Re) értékétől jelentősen eltér. Az elméleti értékek minden esetben jóval kisebb értékeket adnak, az eltérés f = 0,05-0,16 mm/ford tartományban igen nagy: 32-520 %. Az egyenetlenség magasság (Rz) eltérések értéke az előtolás növelésével f = 0,2-0,4 mm/ford tartományban 6-15 % között mozog, tehát az eltérés a nagyobb előtolás tartományban kisebb. Ez a változás jellemző mind a négy vizsgált forgácsolási sebesség esetén, bár a sebesség növelésével az eltérés csökken. A Brammertz-formulával kapott elméleti érdességek a valós Rz értékétől a kis előtolások fázisban (f = 0,05-0,16 mm/ford) 7-40 %-ban térnek el, míg a nagyolási fázisban ez az eltérés lecsökken 0,4-8 %-ra, ami igen kedvező.



4.1. ábra Az elméleti érdesség (*Re*, Re_{Br}) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PA6 esetén

A „B” lapka jobban biztosította a forgács korrekt és gyors elvezetését, mind a simítási és a nagyolási fázisban. Az elméleti érdességek eltéréseit a valós *Rz*-hez képest szemlélteti a 4.2. ábra. Az *Re* értéke a kis előtolásoknál (f = 0,05-0,16 mm/ford) összességében igen magas, 22-317 % között alakul. A v_c =400 m/min forgácsolási sebességnél az *Re* eltérése némileg csökken ugyan , de még itt is közel 180 %. A nagyolási fázisban az eltérések 20-38 % között alakulnak. A Brammertz-formulával kapott elméleti érdességek már sokkal kedvezőbb eredményt adtak. A simítási fázisban az eltérések 0,5-24 % alakultak, míg a nagyolási fázisban ez az érték 2-34 % között változott.



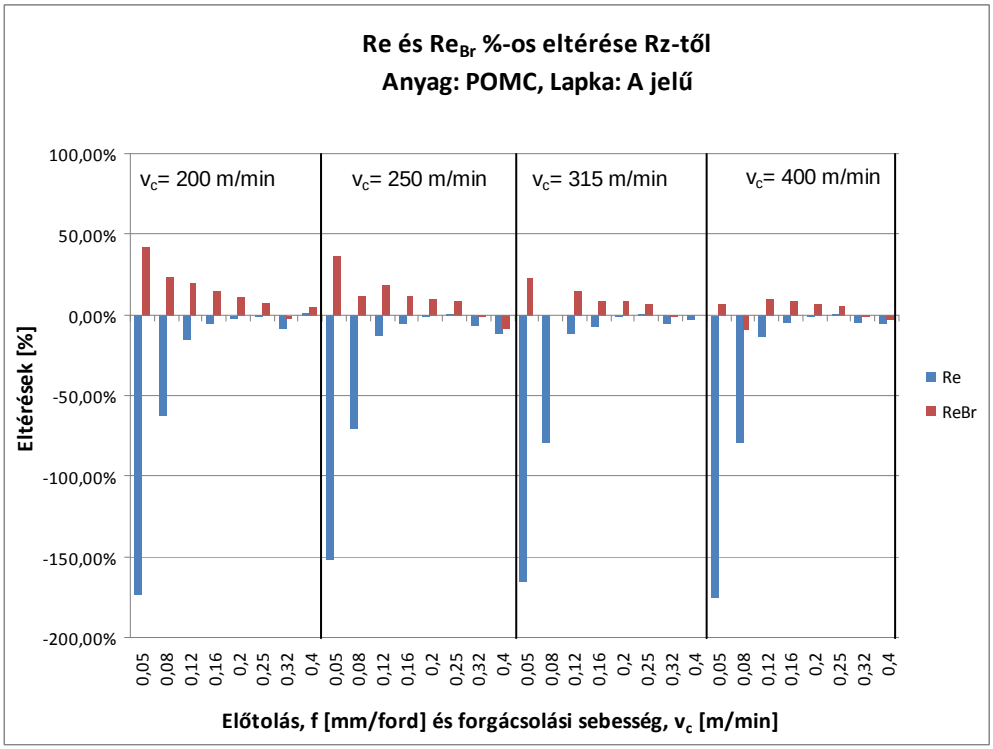
4.2. ábra Az elméleti érdesség (*Re*, Re_{Br}) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PA6 esetén

Összességében megállapítható, hogy az öntött poliamid 6 esetében az elméleti érdesség meghatározására a Brammetrz-formula jobban alkalmazható. Az ezzel kapott eredmények a kisebb csúcsszögű „A" lapkával történő megmunkáláskor (ε_r = 35º) a mért érdességtől 12 % vagy annál kisebb eltérést tapasztaltam az f =0,12-0,4 mm/ford előtolás tartományban és a teljes vizsgálati sebességtartományban.

A „B" lapkával forgácsolt felület értékelésekor megállapítható, hogy a Bauer-féle elméleti érdesség jelentősen nagyobb eltérést mutat, mint a Brammertz-féle formulával kapott értékek. Re_{Br} értékei az f =0,16-0,2 mm/ford előtolás tartományban nagy biztonsággal, mindössze 5-12 % körüli eltéréssel közelítik meg a valós *Rz* értékeket (FARKAS et al. 2007 a)).

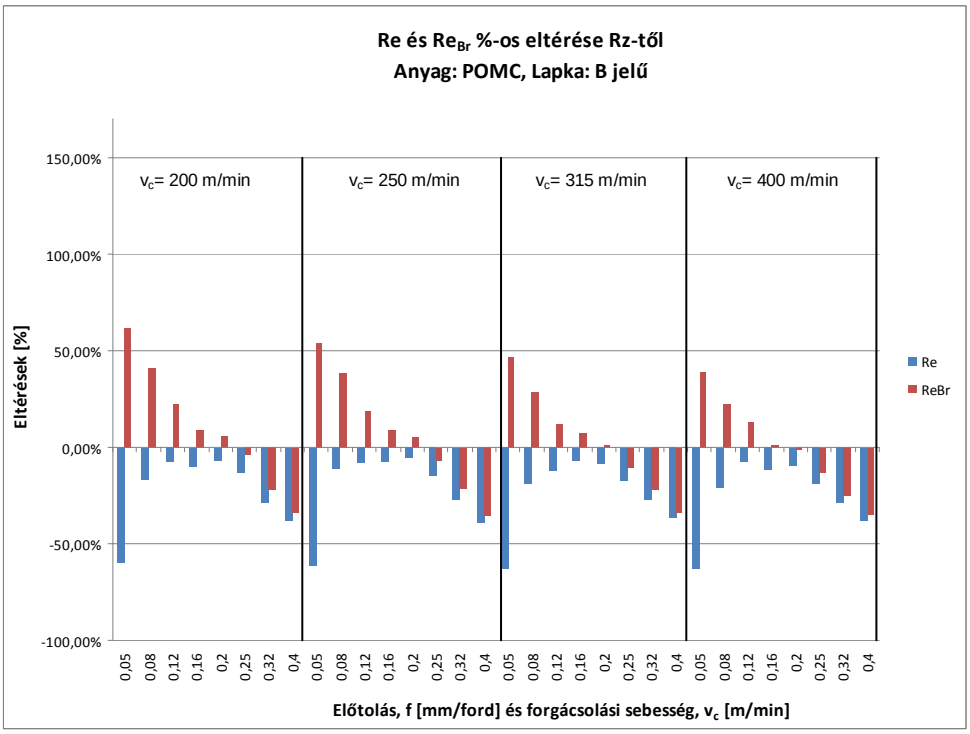
4.1.2. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(oxi-metilén) esetén

A poli(oxi-metilén) az alkalmazott forgácsolási paraméterekkel („A" lapkával) jól esztergálható. A forgácsleválasztás nem volt bizonytalan, a forgács fonalszerűen választódott le a felületről. A 4.3. ábra diagramjából is látható, hogy az *Re*-re (ε_r = 35º lapkánál) kisebb érték adódott, mint a valós *Rz*, az eltérés az f = 0,05-0,08 mm/ford tartományban 80-175 % között alakult. Az előtolás növelésével az elméleti értékek jobb egyezést mutatnak a mért érdességi értékekkel, az eltérések 0-15 % közöttiek.



4.3. ábra Az elméleti érdesség (*Re, Re*$_{Br}$) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél POM C esetén

Az *Re*$_{Br}$ számított értékei többnyire nagyobb értéket adtak, mint a mért *Rz*. Az f = 0,05-0,08 mm/ford előtolásoknál és v_c = 200-250 m/min-nél 11-42 % közötti az eltérés, f = 0,12-0,16 mm/ford tartományban ez lecsökken, 11-20 % lesz. Ugyanakkor a nagyolási tartományban, azaz f = 0,2-0,4 mm/ford-nál és v_c =200-400 m/min forgácsoló sebességeknél *Re*$_{Br}$ értékei még nagyobb biztonsággal közelítik meg a valós mért érdességi értékeket (0,5-8 %).



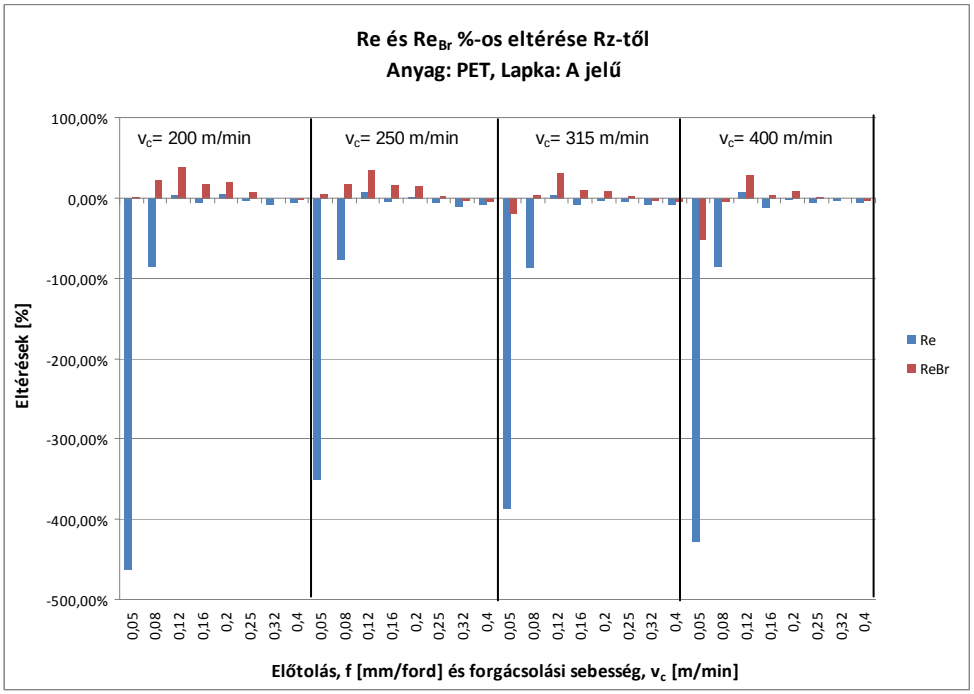
4.4. ábra Az elméleti érdesség (*Re, Re$_{Br}$*) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél POM C esetén

A nagyobb csúcsszögű („B") lapkával forgácsolt poli(oxi-metilén) felület mutatta a legjobb minőséget. Ebben az esetben az érdesség magasság irányú értékekei kisebbek voltak, azaz itt adódott a legjobb felületi érdesség. Az *Re* számított értékei minden esetben kisebbek voltak, mint a mért *Rz* értékek. A legkisebb eltérések az *f* = 0,12-0,2 mm/ford előtolás tartományban adódtak (5-12 %). Az ennél kisebb előtolásoknál az eltérés 7-60 % között van, a nagyobb előtolásoknál, pedig 5-39 % közötti. A 4.4. ábra diagramja mutatja, hogy az elméleti érdesség (*Re$_{Br}$*) a simítási tartományban (*f* = 0,05-0,16 mm/ford) magasabb, mint mért *Rz*, az eltérés 1-61 % között alakult, bár a nagyobb forgácsolási sebességeknél ez az eltérés lecsökken 1-39 % közé. A legjobb közelítés a valós érdességi értékekhez szintén az *f* = 0,12-0,2 mm/ford előtolás tartományban adódtak (1-13 %).

Összességében megállapítható, hogy az poli(oxi-metilén) esetében a „B" lapkával forgácsolt felület értékelésekor a Bauer-féle elméleti érdesség kissé nagyobb eltérést mutat, mint a Brammertz-féle formulával kapott értékek. Mivel itt kaptuk a legjobb forgácsolt felületet, ezért a kisebb mértékű eltérések is itt adódtak a Bauer-formulával is. Az „A" lapkával történő megmunkáláskor a mért érdességtől 10 % vagy annál kisebb eltérés tapasztaltam az *f* = 0,12-0,4 mm/ford előtolás tartományban v_c = 200 m/min és v_c = 400 m/min esetén a Brammertz-féle formulával (FARKAS et al. 2007 a)).

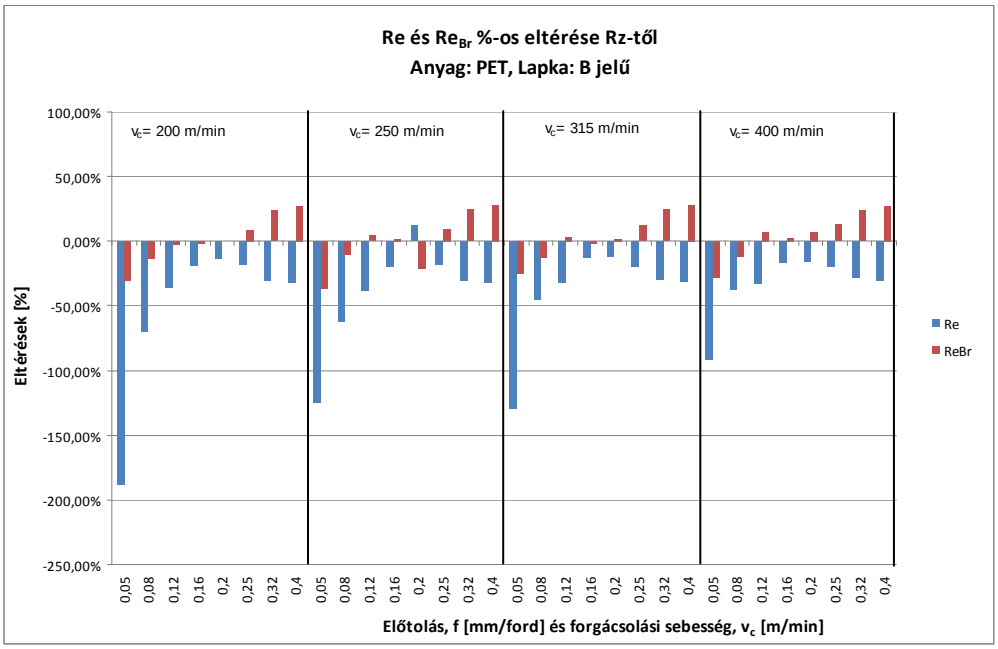
4.1.3. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(etilén-tereftalát) esetén

A poli(etilén-tereftalát) az alkalmazott vizsgálati beállításokkal, „A” lapkával jól forgácsolható, de az f = 0,1 mm/ford-nél kisebb előtolásoknál a forgácsleválasztás gyakran bizonytalan volt. A 4.5. ábra mutatja, hogy az egyenetlenség magasság (Rz) értékét a kis előtolásoknál az elméleti (Re) érdesség jóval meghaladja, az eltérés 4-460 % között alakult. A v_c = 200-400 m/min forgácsolási sebességeknél az f = 0,12-0,4 mm/ford előtolásoknál a mért érdesség értéke az elméleti értékkel közel megegyező, csak kisebb eltérés jellemzi (1-10 %).



4.5. ábra Az elméleti érdesség (Re, Re_{Br}) eltérése a mért Rz értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PET esetén

A Brammertz-féle formula v_c = 200-250 m/min tartományban f = 0,08-0,2 mm/ford előtolásoknál a Bauer képletnél jóval kisebb, 4-53 %-os hibával írja le a várható Rz értékét. Az f = 0,25-0,4 mm/ford tartományokban az Re_{Br} igen kis mértékben, 0-7 % között tér el Rz mért értékeitől.



4.6. ábra Az elméleti érdesség (*Re, Re$_{Br}$*) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PET esetén

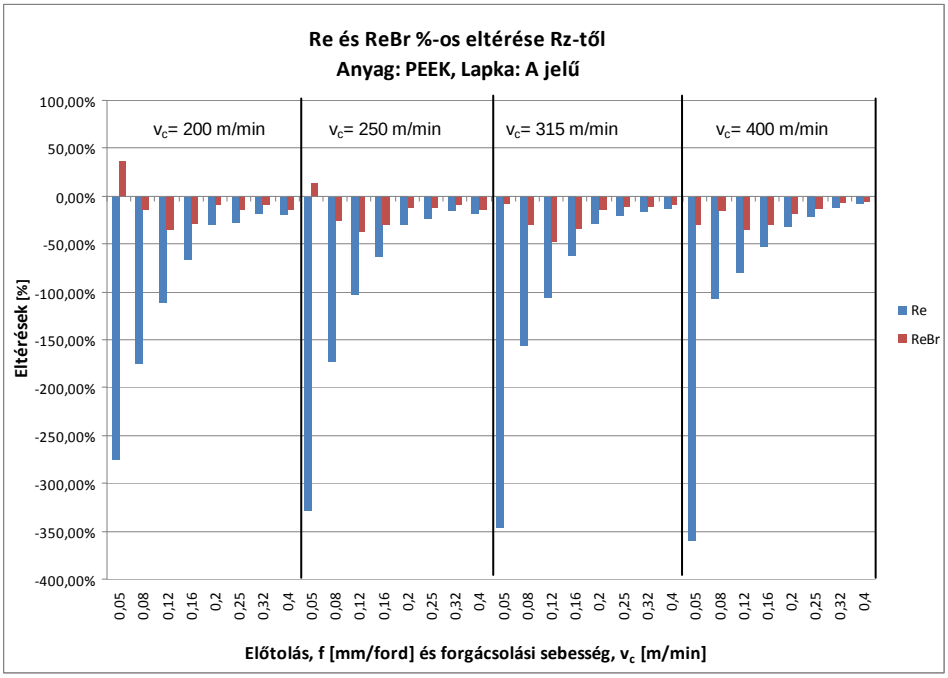
A poli(etilén-tereftalát) a „B” lapkával jól forgácsolható, f = 0,05-0,12 mm/ford előtolásoknál az alkalmazott forgácsolási sebességektől függetlenül az *Ra* értéke 0,3-1,5 µm közötti, azaz igen jó felületi érdesség érhető el. A 4.6. ábra mutatja, hogy az elméleti (*Re*) érdesség értékétől az egyenetlenség magasság (*Rz*), kis előtolásoknál 37-188 %-ban tér el. Az előtolás növelésével az eltérés lecsökken 12-45 %-ra. A Brammertz-formula által számított elméleti érdesség az f = 0,12-0,25 mm/ford előtolásoknál 0,5-13 %-kal tér el a mért *Rz* értékektől, nagyobb előtolásoknál pedig 10-28 %-kal.

Összességében megállapítható, hogy poli(etilén-tereftalát) esetében „A” lapkával történő esztergáláskor az f = 0,12-0,4 mm/ford előtolásoknál a Bauer-formula is jól alkalmazható, míg az f = 0,05 mm/ford, valamint az f = 0,315-0,4 mm/ford tartományokban a Brammertz-formula még jobban közelítette a mért *Rz* értékeket. A „B” lapkával forgácsolt felület értékelésekor elmondható, hogy az f = 0,12-0,25 mm/ford előtolásoknál a Brammertz-féle formulával számított elméleti érdességek nagy biztonsággal közelítik meg a valós *Rz* értékeket.

4.1.4. Az elméleti érdesség vizsgálata poli(éter-éterketon) esetén

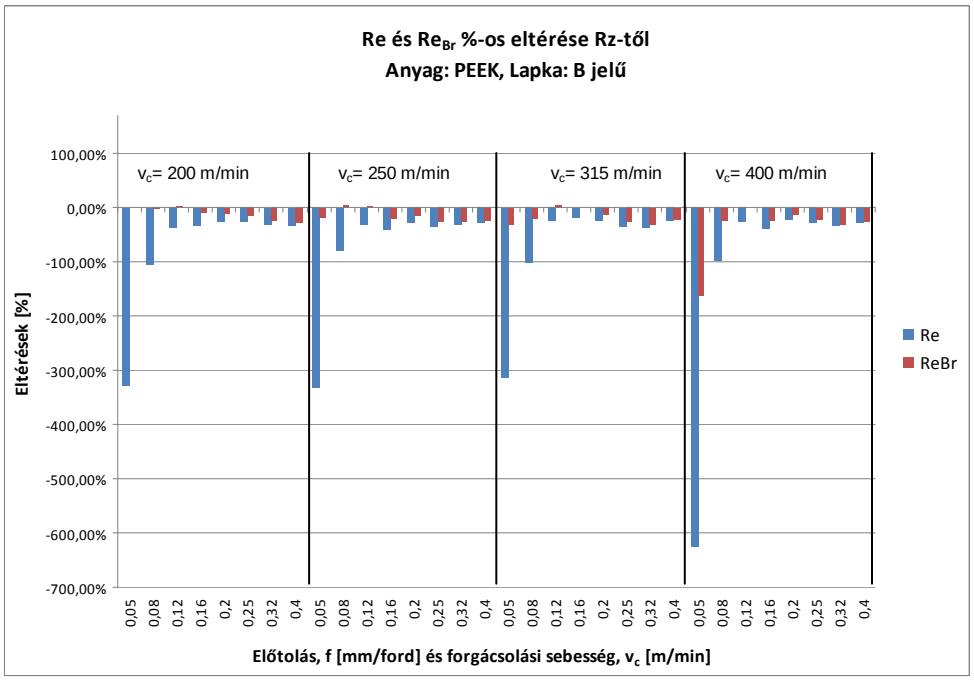
Poliéter-éterketon (PEEK) az „A” lapkával jól forgácsolható. Az egyenetlenség magasság értékei (4.7. ábra), minden előtolásnál meghaladták az *Re* elméleti érdesség értékeit (8-358 %). A Brammertz-formulával számított elméleti érdességek minden esetben jobban közelítették a valós *Rz* értékeket. Az eltérések a

simítási tartományban (f = 0,05-0,16 mm/ford-nál) 7-47 %, míg a nagyolási tartományban lecsökken 5-14 %-ra.



4.7. ábra Az elméleti érdesség (Re, Re_{Br}) eltérése a mért Rz értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PEEK esetén

A PEEK műanyag a „B” lapkával jól forgácsolható, az Ra értéke f = 0,05 mm/ford előtolásnál az alkalmazott forgácsolási sebességektől függetlenül 0,5-0,8 µm közötti, tehát igen jó felületi érdesség érhető el. A 4.8. ábra szerint az egyenetlenség magasság (Rz) értékénél az elméleti (Re) érdesség jóval kisebb, összességében 16-626 %-ban tér el. A Brammertz-formulából számított elméleti érdesség a v_c =400 m/min forgácsolási sebességnél és f = 0,05 mm/ford előtolásnál jelentkező kiugró értéktől eltekintve minimálisan, mindössze 0-20 %-kal tér el a mért Rz értékektől, az előtolás növelésével ez az eltérés 11-30 %-ra nő.



4.8. ábra Az elméleti érdesség (*Re*, *Re*$_{Br}$) eltérése a mért *Rz* értékéhez viszonyítva %-ban a vizsgált előtolásoknál és forgácsolási sebességnél PEEK esetén

Összességében megállapítható, hogy poli(éter-éterketon) esetében mind az „A” és a „B” lapka alkalmazásánál a Brammertz-féle formulával számított elméleti érdességi értékek nagy biztonsággal közelítik meg a valós *Rz* értékeket (FARKAS et al. 2007 b)).

4.2. Faktoriális kísérletterv a forgácsolási paraméterek hatásának vizsgálata a felületi érdesség magasságirányú jellemzőire

A vizsgálatokat a kísérlettervezés módszerével (KEMÉNY et al. 2002, SIPOS 2006) terveztem meg és hajtottam végre, melyet gyakran alkalmaznak a forgácsolási paraméterek hatásának vizsgálatára (ABOUELATTA 2001). A megmunkált felületek érdességi profilja magasságirányú jellemzőinek (*Ra*, *Rz*) mért értékeit kétfaktoros hatványfüggvényekkel modelleztem (FARKAS 2007). A faktoriális kísérlettervben tehát:

- a paraméterek:
  - a profil átlagos eltérése: *Ra* [μm],
  - a profilegyenetlenség magassága: *Rz* [μm],

- a faktorok:
  - forgácsoló sebesség, v_c [m/min],
  - előtolás, f [mm/ford] voltak.

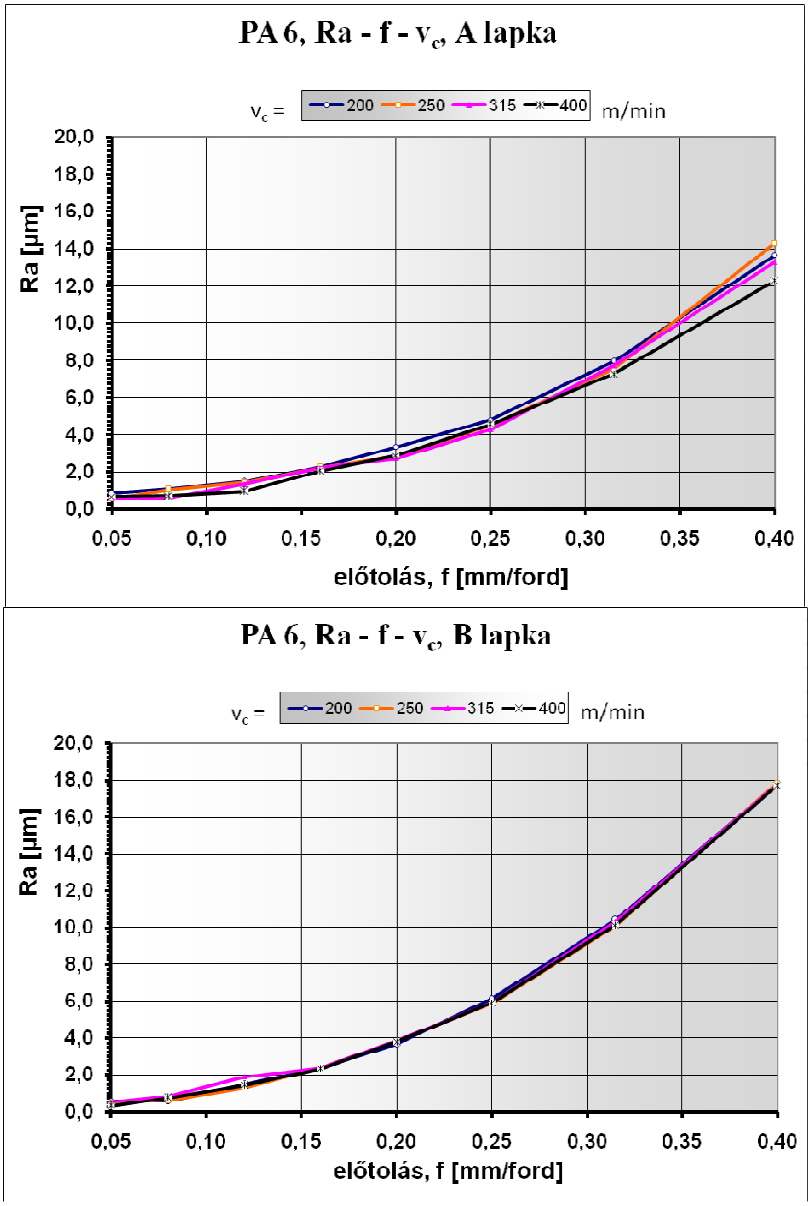
A felületi érdesség két jellemzője (paraméterei) és a beállított forgácsolási adatok (faktorok) az alábbi függvénnyel írható le:

$$R = C_R \cdot v_c^{x_1} \cdot f^{x_2} \ [\mu m] \qquad (4.1)$$

A regressziós függvényvizsgálatokat és az eredmények kiértékelését a Minitab14 statisztikai szoftverrel végeztem el. A program segítségével meghatároztam az egyes modellek együtthatóját és kitevőit (C_R, x_1, x_2), a szórás (s) és a korrelációt mutató determinációs együttható (R^2) értékeit.

4.2.1. Vizsgálat eredménye öntött poliamid 6 műszaki műanyagnál

A 4.9. ábra az átlagos érdesség alakulását mutatja az előtolás függvényében, négy forgácsoló sebesség esetén. Az ábrákból látható, hogy az öntött poliamid 6 esetén a simítási fázisban (f = 0,05-0,16 mm/ford) az *Ra* értéke 2 μm alatt tartható.



4.9. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „A” és „B” lapkával történő megmunkálásnál öntött poliamid 6 esetén

Az *Ra* és *Rz* paraméterekre kapott regressziós függvények (4.1. táblázat) a mérési eredményeket kis szórással (s = 0,093-0,111) és viszonylag nagy korrelációval (R^2 = 0,921-0,971) írják le. A változók kitevői mindkét lapka esetében szignifikánsak. Ez alól csak a B jelű lapka képez kivételt, mert a forgácsoló sebesség hatása kisebb, mint a mért értékek szórása.

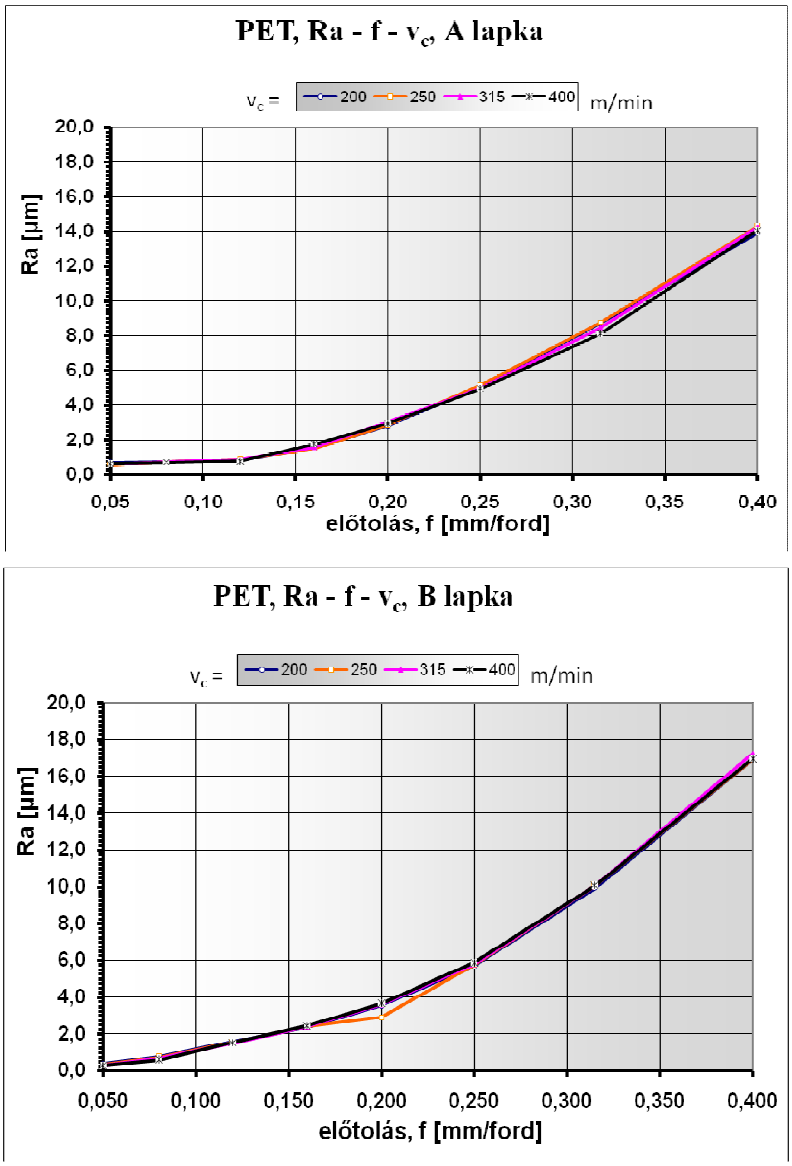
4.1. táblázat Regressziós függvényvizsgálat eredményei

Öntött poliamid 6					
„A” lapka			„B” lapka		
Függvénykapcsolat	*s*	R^2	Függvénykapcsolat	*s*	R^2
$Ra = 191 \cdot v_c^{-0,292} \cdot f^{1,46}$	0,111	0,94	$Ra = 93 \cdot v_c^{-0,036} \cdot f^{1,8}$	0,093	0,971
$Rz = 631 \cdot v_c^{-0,316} \cdot f^{1,2}$	0,106	0,921	$Rz = 240 \cdot v_c^{-0,017} \cdot f^{1,58}$	0,105	0,953
Poli(etilén-tereftalát)					
„A” lapka			„B” lapka		
Függvénykapcsolat	*s*	R^2	Függvénykapcsolat	*s*	R^2
$Ra = 46 \cdot v_c^{-0,008} \cdot f^{1,6}$	0,1606	0,899	$Ra = 120 \cdot v_c^{-0,067} \cdot f^{1,88}$	0,052	0,992
$Rz = 117 \cdot v_c^{-0,026} \cdot f^{1,37}$	0,154	0,877	$Rz = 490 \cdot v_c^{-0,105} \cdot f^{1,75}$	0,074	0,98
Poli(oxi-metilén)					
„A” lapka			„B” lapka		
Függvénykapcsolat	*s*	R^2	Függvénykapcsolat	*s*	R^2
$Ra = 50 \cdot v_c^{0,003} \cdot f^{1,68}$	0,077	0,977	$Ra = 110 \cdot v_c^{-0,002} \cdot f^{2,1}$	0,035	0,997
$Rz = 234 \cdot v_c^{-0,062} \cdot f^{1,54}$	0,076	0,974	$Rz = 288 \cdot v_c^{0,0319} \cdot f^{1,95}$	0,060	0,99
Poli(éter-éterketon)					
„A” lapka			„B” lapka		
Függvénykapcsolat	*s*	R^2	Függvénykapcsolat	*s*	R^2
$Ra = 63 \cdot v_c^{-0,048} \cdot f^{1,48}$	0,067	0,978	$Ra = 42 \cdot v_c^{0,04} \cdot f^{1,6}$	0,110	0,95
$Rz = 275 \cdot v_c^{-0,089} \cdot f^{1,36}$	0,054	0,983	$Rz = 135 \cdot v_c^{0,062} \cdot f^{1,47}$	0,128	0,923

Az „A” lapkával történő megmunkáláskor a beállított forgácsolási sebességnek csak a PA6 eszregálásánál volt kisebb hatása ($-0,292 \leq x_1 \leq -0,316$) van a felületi érdességre, míg az összes többi esetben ez minimálisnak mondható. Az előtolás kitevői $1,2 \leq x_2 \leq 1,46$ között alakultak, tehát kisebb hatása van a mérési eredményre, mint ahogy azt a Bauer-féle formula mutatja.
A „B”lapka esetében a sebesség hatása elhanyagolható, míg az előtolás $1,58 \leq x_2 \leq 1,8$ kitevőértékeket mutat, ez tehát jobban megfelel a szabályos élgeometriájú esztergálásnál alkalmazott elméleti képletnek. Mindez a kisebb érdességű, éppen ezért élesebb élnek tulajdonítható, míg az „A” lapka esetében nagyobb hatása lehetett a lapka rosszabb eredeti élérdességének, illetve nagyobb éllekerekedésének.

4.2.2. Vizsgálat eredménye poli(etilén-tereftalát) műszaki műanyagnál

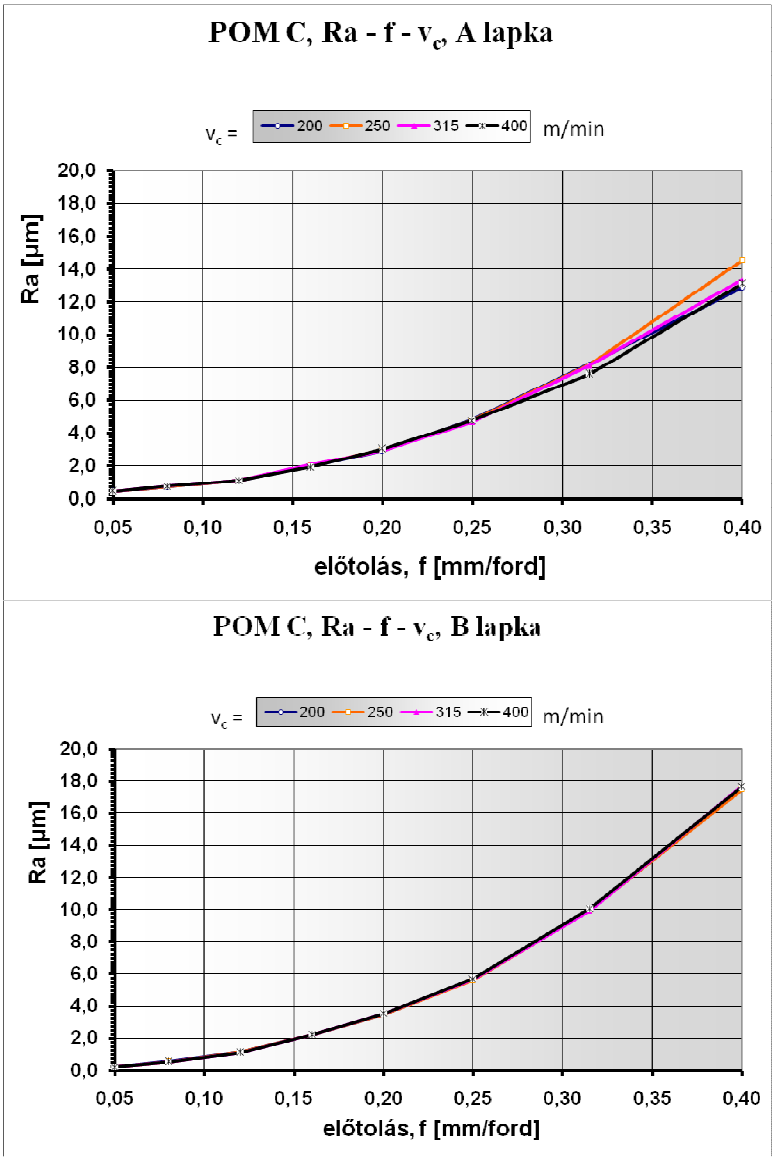
A poli(etilén-tereftalát) műanyagra a 4.1. táblázat tanúsága szerint összességében igaz az, hogy a vizsgált tartományban a sebesség hatása az érdesség magasságirányú jellemzőire igen kicsi ($-0{,}008 \leq x_1 \leq -0{,}105$) (4.10. ábra). Az előtolás hatása az *Ra* és *Rz* értékeire az $\varepsilon_r = 35^\circ$ csúcsszögű lapkánál egynél nagyobb kitevőt eredményezett ($1{,}37 \leq x_2 \leq 1{,}6$), míg az $\varepsilon_r = 55^\circ$ csúcsszögű lapkánál x_2 értéke jobban megközelíti a kettőt.



4.10. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „A” és „B” lapkával történő megmunkálásnál poli(etilén-tereftalát) esetén

4.2.3. Vizsgálat eredménye poli(oxi-metilén) műszaki műanyagnál

A poli(oxi-metilén) esztergálásakor – mindkét lapkánál – a vizsgált tartományban a sebesség hatása igen kicsi ($-0{,}002 \leq x_1 \leq -0{,}062$), nem gyakorol szignifikáns hatást az érdesség vizsgált jellemzőire.



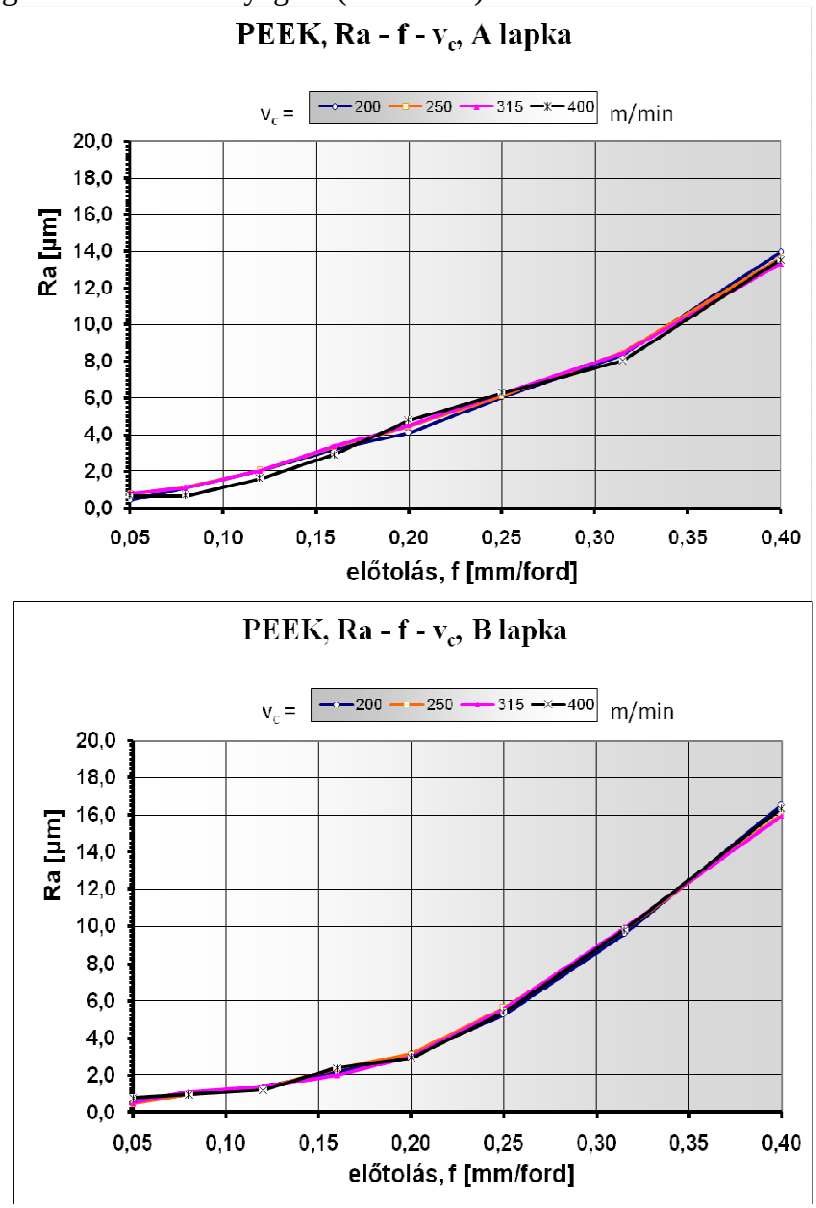
4.11. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „A” és „B” lapkával történő megmunkálásnál poli(oxi-metilén) esetén

Az előtolás hatása azonban jobban érvényesül, viszonylag szabályosan követi a várható érdességet meghatározó Bauer-féle formulát, az *Ra*, *Rz* értéke az *f* értékével

közel négyzetesen növekszik ($1{,}54 \leq x_2 \leq 2{,}1$), megjegyezve, hogy a „B” jelű lapka függvénye itt is magasabb kitevőt ad (4.11. ábra).

4.2.4. Vizsgálat eredménye poli(éter-éterketon) műszaki műanyagnál

A mérési eredmények a poli(éter-éterketon) esetében hasonlóan alakultak, mint a többi vizsgált műszaki műanyagnál (4.12. ábra).



4.12. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „A” és „B” lapkával történő megmunkálásnál poli(éter-éterketon) esetén

A kapott regressziós függvények azt mutatják, hogy ezek jól illeszkednek a mérési eredményekhez: viszonylag kis szórást (s = 0,054-0,128) és igen magas korrelációt (R^2 = 0,923-0,983) tapasztaltam.

Összességében a vizsgált műszaki műanyagféleségeknél az érdességi jellemzőkre a forgácsoló sebesség csekély hatása figyelhető meg. Ez a tapasztalat ellentétes azokkal a mérési eredményekkel, amelyeket kísérleteinkben az acélok forgácsolásánál tapasztaltunk. Ezt a megállapításomat támasztja alá az M4. mellékletben található diagram, amely az átlagos érdességet mutatja a forgácsoló sebesség függvényében azonos előtolásokkal és fogásmélységgel a vizsgált műszaki műanyagok esetén.

4.3. Növelt csúcssugarú szerszámmal végzett forgácsolási kísérlet eredényei

A kísérletek harmadik fázisában növelt csúcssugarú szerszámmal végeztem forgácsolási kísérleteket. Az egyes kísérleti beállítások forgácsolási adatkombinációi a következők voltak:

- forgácsoló sebesség, v_c = 400 m/min (állandó érték),
- előtolás, f = 0,08; 0,125; 0,2; 0,315 mm/ford,
- fogásmélység, a = 1,0 mm
- fogásmélység, a = 2,0 mm
- munkadarab méretei: d_{md} = Ø 40 mm
  l_{md} = 80 mm,
- hűtést a megmunkálás során nem alkalmaztam.

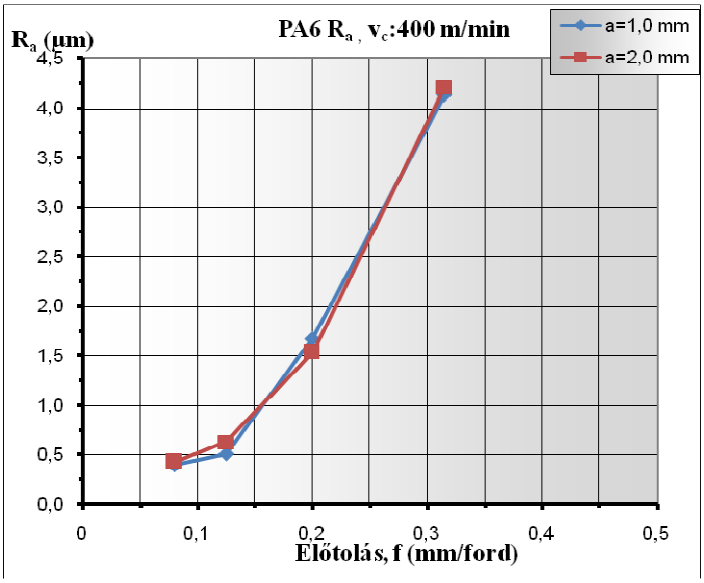
Az esztergáláshoz alkalmazott „C” jelölésű lapka geometriai jellemzői (VCGX 11T308-AL/H10):

- csúcsszög: $\varepsilon_r = 55^\circ$
- hátszög: $\alpha_0 = 5^\circ$
- csúcssugár: r_ε = 0,8 mm
- lapkavastagság: s = ~ 3,9 mm

A mérés során a topográfiai kép kialakítása – 2x2 mm-es területen – egymástól meghatározott távolságra (jelen esetben 4 μm) lévő profilmetszetek létrehozásával történt (M9. melléklet). A felületekről a JEOL JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkópos felvételek is készültek, melyek további értékes információkat adnak a felületről (FARKAS et al.2006).

4.3.1. Eredmények kiértékelése öntött poliamid 6 esetén

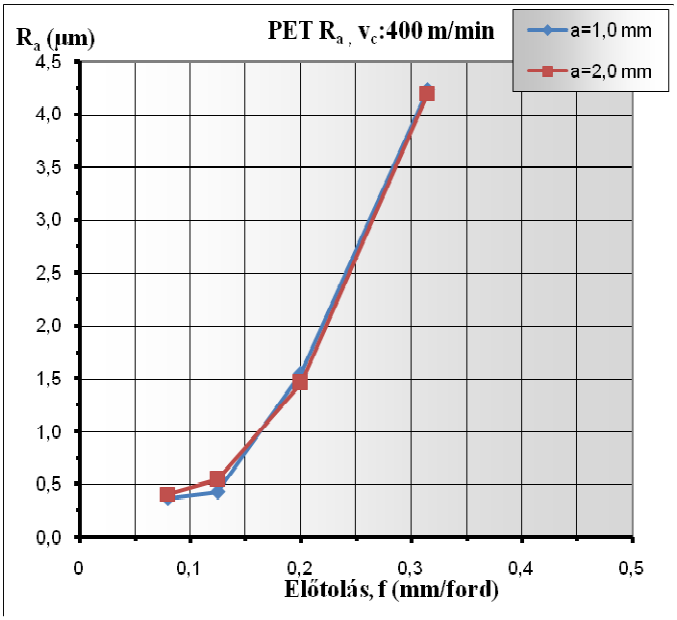
Az öntött poliamid 6 esztergálása során a forgács a munkadarabról fonalszerűen választódott le (M7. melléklet). A 4.13. ábra diagramjából látható, hogy az átlagos érdesség (*Ra*) értéke az *f* = 0,08-0,125 mm/ford tartományban 0,5 µm körül alakul és ez a fogásmélység, *a* = 1mm-ről *a* = 2 mm-re történő növelésével biztosan tartható. *Ra* értéke az előtolás növelésével arányosan nő mindkét fogásmélység esetén.



4.13. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „C” lapkával történő megmunkálásnál az öntött poliamid 6 esetén

4.3.2. Eredmények kiértékelése poli(etilén-tereftalát) esetén

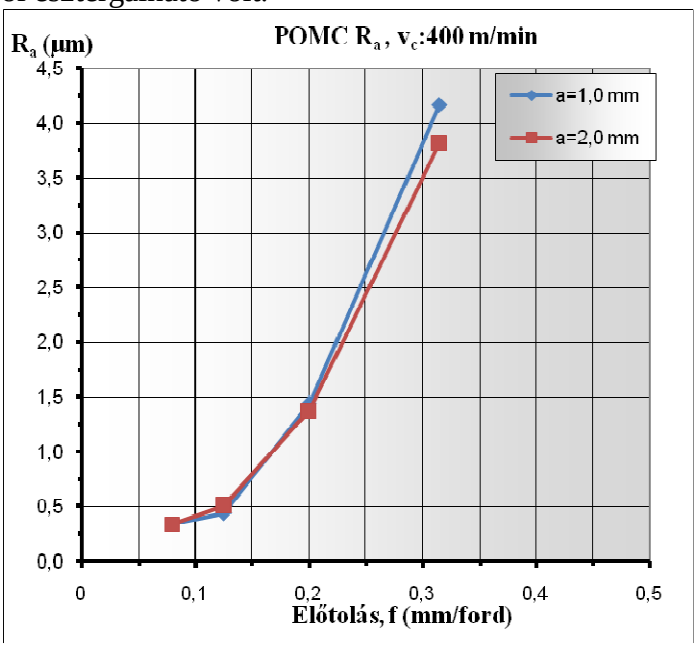
Az poli(etilén-tereftalát) az alkalmazott beállításokkal jól forgácsolható, a forgács lazább szerkezetű lett és megszűnt a fonalszerű alak (M7. melléklet). A 4.14. ábra diagramjából látható, hogy az átlagos érdesség (*Ra*) értéke az *f* = 0,08-0,125 mm/ford tartományban 0,5 µm körül alakul és az előtolás növelésével *Ra* értéke mindkét fogásmélység alkalmazásával azonosan nő.



4.14. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „C” lapkával történő megmunkálásnál az poli(etilén-tereftalát) esetén

4.3.3. Eredmények kiértékelése poli(oxi-metilén) esetén

Az poli(oxi-metilén) a kísérletek harmadik fázisában az alkalmazott forgácsolási paraméterekkel jól esztergálható volt.

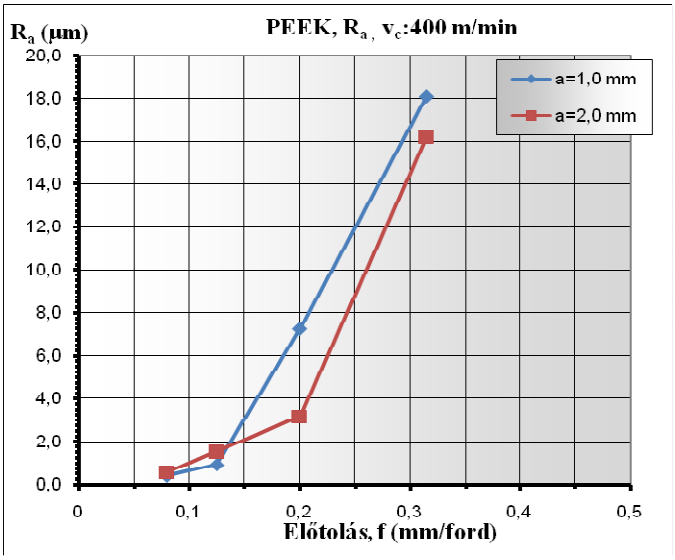


4.15. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „C” lapkával történő megmunkálásnál az poli(oxi-metilén) esetén

A forgácsleválasztás nem volt bizonytalan, a forgács laza szerkezetű spirálforgácsként választódott le a felületről. (M7. melléklet). A 4.15. ábra diagramjából látható, hogy az átlagos érdesség (*Ra*) értéke az *f* = 0,08-0,125 mm/ford tartományban 0,5 µm körül adódott mindkét fogásmélység-érték (*a* = 1 mm és *a* = 2 mm) esetén.

4.3.4. Eredmények kiértékelése poli(éter-éterketon) esetén

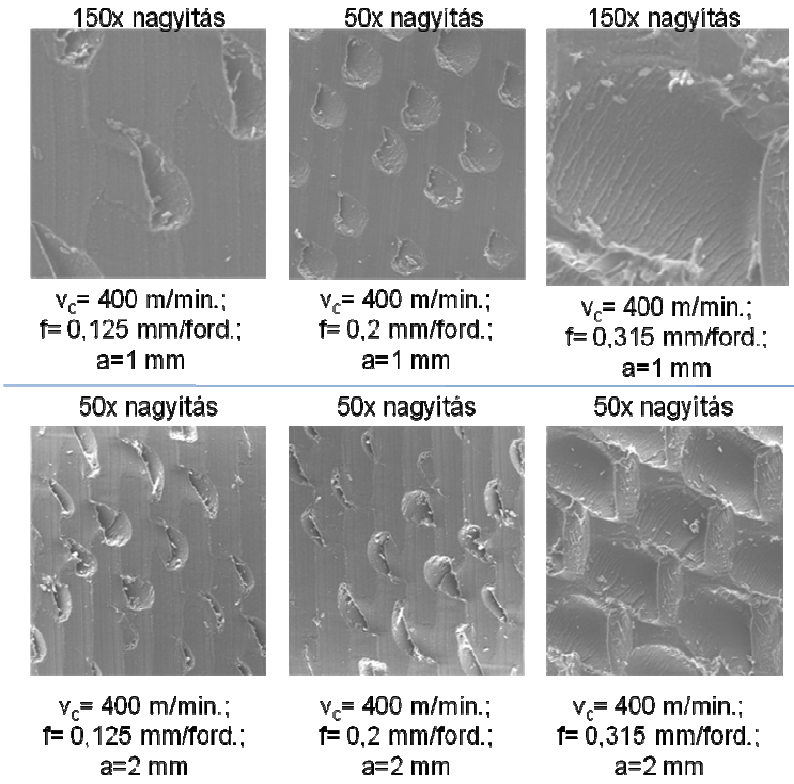
A poli(éter-éterketon) esztergálása közben leváló forgácsok megfelelően töredezett alakúak voltak (M7. melléklet).



4.16. ábra Az átlagos érdesség (*Ra*) alakulása „C” lapkával történő megmunkálásnál az poli(éter-éterketon) esetén

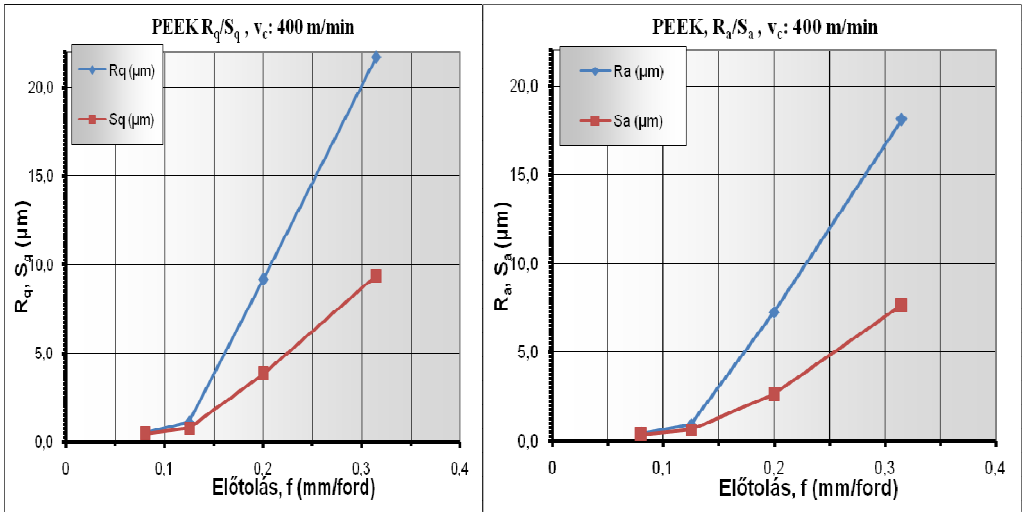
Az előtolást *f* = 0,2 mm/ford értékre emelve apró, pattogó, törtforgácsot eredményezett.
Az *Ra* értéke *f* = 0,08-0,125 mm/ford-nál 2 µm alatt alakult. Az előtolás növelésével az átlagos érdesség nőtt, az *a* = 2,0 mm fogásvétellel valamivel jobb felületi minőség adódott a nagyobb előtolásoknál, mint *a* = 1,0 mm-nél (4.16. ábra).

Az előtolás növelésével a PEEK anyagszerkezetében olyan változások következtek be, amelyek a felületi minőség drasztikus romlásához vezettek.



4.17. ábra Esztergált PEEK műanyag felület SEM képe

Az elektronmikroszkópos felvételek egyértelműen igazolják, hogy a megmunkálási nyomokban kiszakadások és felületi hibák jelentkeztek, melyek nagymértékben befolyásolták a felület minőségét (4.17. ábra).
Az esztergált felületről az elektronmikroszkópos képek 50x és 150x nagyításban készültek. A felvételeken megfigyelhetők a jellegzetes megmunkálási nyomok, valamint a felület hibái, a barázdákban lévő „anyagkiszakadások”. A forgács a felületről nem folyamatosan vált le, hanem egy ideig felgyűrődött, majd kiszakadt, tört forgácsot adva, de a felületen kagylószerű krátereket hagyva. A SEM felvétel nagy előnye, hogy megmutatja a felület legapróbb részleteit, de hátránya, hogy nem érzékelhető a mélység, valamint nem ad számszerűsíthető paramétereket. A PEEK esetében 3D-s méréseket is elvégeztem tapintótűs eljárással, így a topográfiai felvételek is jó összehasonlítási alapot biztosítottak (M9. melléklet).

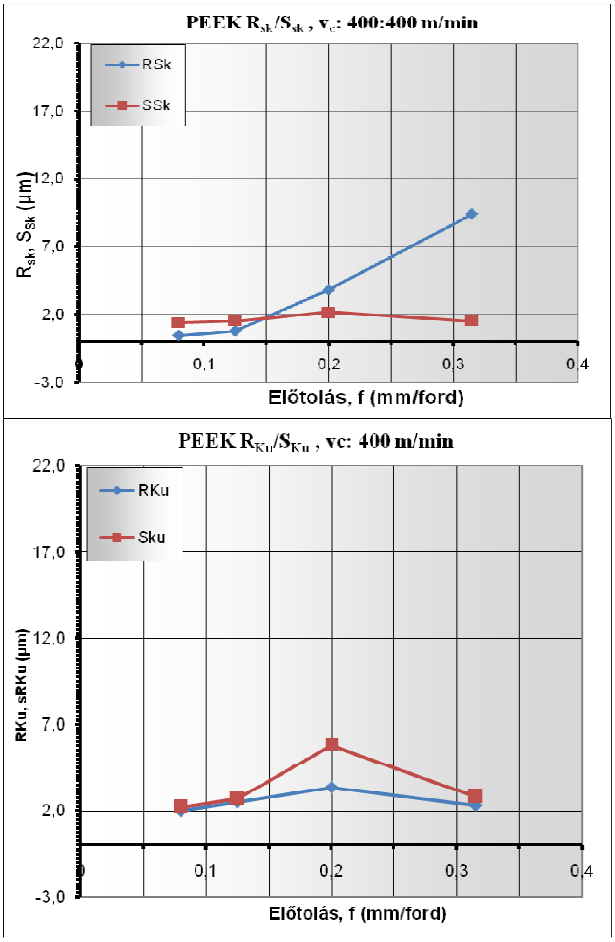


4.18. ábra 2D-s és 3D-s paraméterek összevetése PEEK műanyagnál

Az amplitúdó paraméterek közül az *Ra* és az *Sa* viszonylag jó egyezést mutatnak a kis előtolások tartományában (*f* = 0,05-0,125 mm/ford). A nagyolási fázisban, ahol már a felületet durva hibák jellemzik, a két paraméter közötti eltérés jelentős. A 2D-s mérőszám érzékenyebben reagál a felület egyenetlenségeire, mint a 3D-s paraméter. Az *Rq* és az *Sq* paraméterek esetében is hasonlóak az eredmények (4.18. ábra). Tehát a 2D-s érdességi jellemzők érzékenyebben reagálnak a felületi egyenetlenségekre.

A magasságeloszlás hegyessége (*Rku* és *Sku*) jól jellemzi az egyenetlenségek formáját és ezáltal utalnak a felületek működési jellemzőire is, a 2D-s és 3D-s paraméterek jó egyezést mutatnak.

Lényeges eltérés tapasztalható az *Rsk* és *Ssk* mérőszámok esetében. A 3D-s paraméter jó hordozótulajdonságú, kopásálló felületre utal, míg a 2D-s jellemző az egyedi, „síkbeli” mérés következtében azt mutatja, hogy a felületen több hegyes csúcs is található (4.19. ábra).



4.19. ábra 2D-s és 3D-s paraméterek összevetése PEEK műanyagnál

Összességében elmondható, hogy a poli(éter-éterketon) műszaki műanyagnál a v_c = 400 m/min forgácsoló sebességgel és az f = 0,08-0,12 mm/ford előtolásokkal megmunkált felületen a mikrogeometriai és a mikrotopográfiai paraméterek jó egyezést mutatnak, mivel itt a felületet a megmunkálási nyomok jellemzik. A v_c = 400 m/min forgácsoló sebességgel és az f = 0,2-0,315 mm/ford előtolással esztergált felületen a megmunkálási nyomokban durva felületi hibák, kagylószerű kiszakadások jelentkeztek. A vizsgált magasságirányú kétdimenziós mikrogeometriai paraméterek a durva felületi eltérésekre érzékenyebben reagáltak, mint a háromdimenziós mérőszámok, ezáltal akár eltérő felületjellegre is utalhatnak.

Az elvégzett vizsgálatokból megállapítható, hogy a növelt csúcssugarú szerszám mind az a = 1, mind az a = 2 mm fogásvételnél teljesen egyöntetű érdességet állított elő, a PEEK minőséget kivéve. Kísérleteinkből továbbá az állapítható meg, hogy a PEEK műanyag r_ε = 0,8 mm csúcssugarú késsel való esztergálásnál forgácsleválasztási problémák jelentkezhetnek.

4.4. Az átlagos érdesség és a műszaki műanyagok mechanikai jellemzőinek kapcsolata

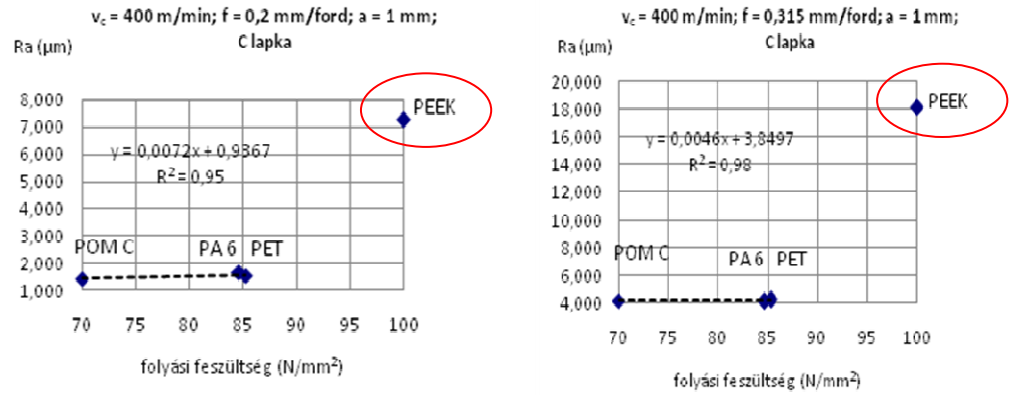
A vizsgálat célja az volt, hogy meghatározzam a kísérletben alkalmazott műszaki műanyagok mechanikai jellemzői (folyási feszültség, szakadási nyúlás, rugalmassági modulusz), fajlagos ütőmunkája (Charpy) valamint keménysége (golyóbenyomásos, Shore D) hogyan befolyásolja az átlagos érdességet (*Ra*).

A bemutatott diagramok az átlagos érdesség (*Ra*) változását mutatják az egyes vizsgált jellemzők függvényében a három alkalmazott lapkatípusnál (A, B, C), v_c = 400 m/min forgácsoló sebesség; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford előtolás és a = 0,5; 1 mm fogásmelység értékeknél.

Az *Ra* mérési eredményeket értékelve a mechanikai tulajdonságok, a változó előtolás és eltérő él-kialakítás („A”, „B”, „C”-típusú lapka) függvényében, az alábbi megállapítások tehetők (M10. melléklet):

A **folyási feszültség**nek korlátozott hatása érvényesül az *Ra* alakulására, mely függ a forgácsoló lapka él-kialakításától („A”, „B”, „C” típusú lapka) és az előtolástól. Kis előtolásoknál (f = 0,08 mm/ford) gyakorlatilag nincs hatása a folyási feszültségnek az *Ra*-ra. Közepes előtolásnál (f = 0,2 mm/ford) már nagyobb szórások jelentkeznek, de még mindig függetlennek tekinthető az „A”, és „B” lapka esetén. A „C” lapka alkalmazásánál a nagyobb folyási feszültség erősen növelte az *Ra* értékét a növekvő előtolással, ami elsősorban a PEEK anyagra érvényes. A szélsőséges előtolási értéknek tekinthető f = 0,315 mm/ford esetén a trend részben felerősödik: „A” és „B” lapka esetén független az *Ra* a folyási feszültségtől, „C” lapka esetén tovább nő az eltérés a 100 MPa folyási feszültség (PEEK) esetén.

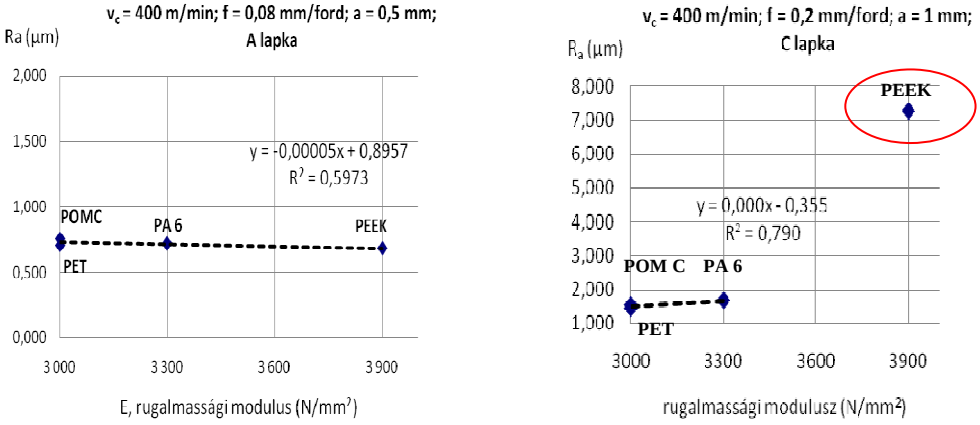
Összességében megállapítható, hogy a folyási feszültség értékeknek nincs jelentős hatása állandó v_c érték mellett a mért *Ra* értékekre az „A” és „B” él-kialakítás esetén. A forgácsoló él-kialakítás változtatása „C” típusra már változtatja a függetlenséget: 85 MPa folyási feszültség felett növekvő *Ra* volt tapasztalható. A jelenség kivételnek tekinthető, mivel a PEEK anyagminőség – a nagyteljesítményű anyagcsoport tagja - esetén következett be (4.20. a) és b) ábra). A PEEK hőállósági és hőalak-tartóssági tulajdonságai alapvetően eltérnek a többi vizsgált anyagétól, ami az eredmények szerint a forgácsleválásra és a felületi érdességre is kihatnak.



a) b)

4.20. ábra a) *Ra* értékekei „C” lapka esetén, a folyási feszültség függvényében. Közepes előtolásnál a PEEK kiválik a trendből. b) *Ra* a folyási feszültség függvényében, növelt előtolásnál, „C” lapka esetén.

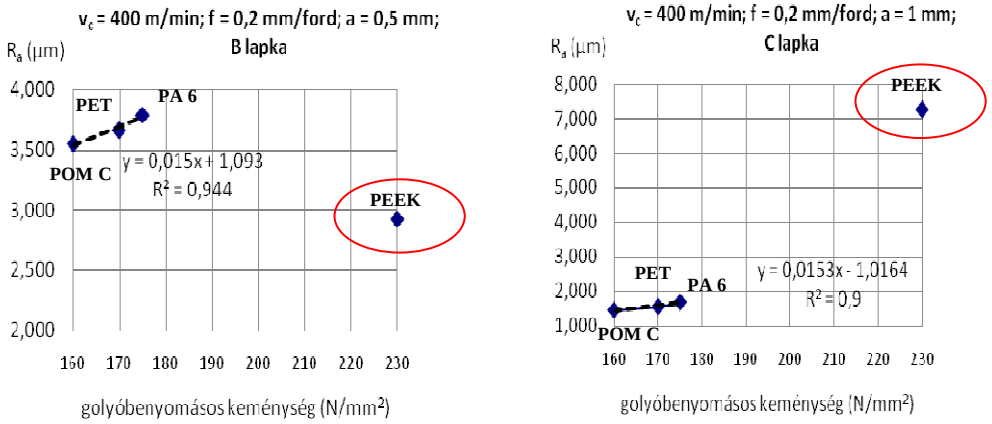
A **szakadási nyúlás** és **rugalmassági modulus** függvényében vizsgált *Ra* értékek alapvetően függetlenséget mutatnak az „A” (4.21. a) ábra) és „B” lapka él-kialakítás esetén, kis, közepes- és nagy előtolások esetén is (néhány esetben a PEEK kivétel). A „C” típusú lapka alkalmazása során a PEEK anyag határozottan kivételt képez az eredmény sorban. Kiugróan magas *Ra* értékeket mutat az előtolás növelésével (4.21. b) ábra).



a) b)

4.21. ábra a) *Ra* értékekei „A” lapka esetén, a rugalmassági modulus függvényében, kis előtolásnál. b) *Ra* a rugalmassági modulus függvényében, közepes előtolásnál, „C” lapka esetén.

A **Charpy fajlagos ütőmunka** függvényében elemzett *Ra* értékekről megállapítható, hogy a nagyteljesítményű műszaki műanyagok közé tartozó PEEK itt is elkülöníthető az általános rendeletetésű műszaki műanyagoktól. Az „A” és „B” lapka kialakítás esetén az eltérés kismértékű, míg a „C” lapka esetén, növelve az előtolás értékét f = 0,315 mm/ford-ra, kiugróan nagy eltérés adódik az *Ra*-ra, mely lineáris regresszióval nem vehető figyelembe.

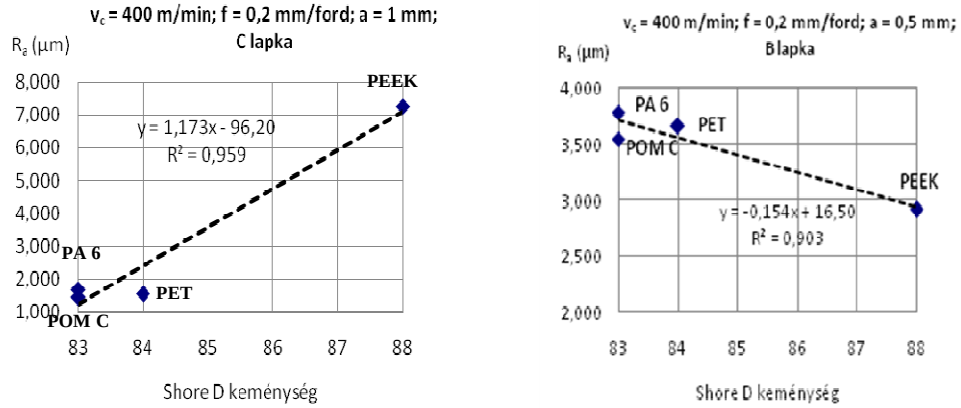


a) b)

4.22. ábra a) *Ra* értékekei „B” lapka esetén, a golyóbenyomásos keménység függvényében, közepes előtolásnál. b) *Ra* a golyóbenyomásos keménység függvényében, közepes előtolásnál, „C” lapka esetén.

A **golyóbenyomásos keménység**nél, az „A” lapka esetén, a növekvő előtolással nem fogalmazható meg egyértelmű összefüggés vagy trend az *Ra* és a keménység között. „B” lapka esetén – a PEEK kedvezően elkülönül – a vizsgált általános műszaki műanyagok esetén, a növekvő golyóbenyomásos keménység növekvő *Ra* értéket eredményezett (4.22. a) ábra). A „C” lapka esetén a PEEK kiugróan eltér a többi anyagtól, melyeknél az *Ra* enyhén növekszik a golyóbenyomásos keménység növekedésével (4.22. b) ábra).

Shore D keménység függvényében vizsgálva *Ra*-t, „A” és „C” lapka esetén megállapítható, hogy a legkisebb előtolás mellett (f = 0,08 mm/ford) függetlenség állapítható meg a Shore D értékek és az *Ra* között. Növelve az előtolást, az *Ra* a Shore-D növekedésével szintén nő (4.23. a) ábra). „B” lapkával forgácsolt felületeknél, a növekvő előtolás esetén, a keménység növelése az *Ra* csökkenésével járt (4.23. b) ábra).



a) b)

4.23. ábra a) *Ra* értékekei „C” lapka esetén, a Shore D keménység függvényében, közepes előtolásnál. b) *Ra* a Shore D keménység függvényében, közepes előtolásnál, „B” lapka esetén.

4.5. Új tudományos eredmények

1. tézis: Az egyélű szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett esztergálási kísérletek eredményeiből kimutattam, hogy a megmunkált felület magasságirányú mikrogeometriai jellemzőit (*Ra*, *Rz*) a $200 \leq v_c \leq 400$ m/min forgácsolási sebesség csak minimálisan befolyásolja az általam alkalmazott vizsgálati tartományban. Ez ellentétes az acélok forgácsolásánál tapasztaltakkal. A megállapítás érvényes a kísérletben alkalmazott négy hőre lágyuló műszaki műanyagra (PA 6, PET, POM C, PEEK)

2. tézis: A forgácsolási kísérletsorozattal megállapítottam, hogy a vizsgált műszaki műanyagoknál az alkalmazott lapkatípusokkal („A”, „B” lapka), az f = 0,05-0,16 mm/ford előtolásokkal a forgácsoló sebesség v_c = 200-400 m/min között tartásával az átlagos érdesség, $Ra < 2$ µm.

3. tézis: Megállapítottam, hogy az acélok esztergálásakor a várható felületi érdesség előre jelzésére alkalmazott elméleti összefüggések (Bauer, Brammertz-formula) a műszaki műanyagok esztergált felületeinek minősítésére eltérő adattartományban - a műszaki műanyag tulajdonságaitól függően - alkalmazhatók.

4. tézis: Kimutattam, hogy a műszaki műanyagok esztergáló megmunkálásánál a várható felületi érdesség (*Ra*, *Rz*) jól modellezhető törtkitevős hatványfüggvényekkel ($Ra = C_{Ra} \cdot v_c^{x_1} \cdot f^{x_2}$; $42 \leq C_{Ra} \leq 191$; $-0{,}002 \leq x_1 \leq 0{,}04$; $1{,}46 \leq x_2 \leq 2{,}1$; $0{,}035 \leq s \leq 0{,}16$; ; $0{,}95 \leq R^2 \leq 0{,}997$, és

$Rz = C_{Rz} \cdot v_c^{x_1} \cdot f^{x_2}$; $117 \le C_{Rz} \le 631$; $-0{,}017 \le x_1 \le 0{,}062$; $1{,}2 \le x_2 \le 1{,}95$; $0{,}054 \le s \le 0{,}154$; ; $0{,}87 \le R^2 \le 0{,}99$).

5 tézis: Megállapítottam, hogy a vizsgált forgácsolási tartományban az „A” típusú és a „B” típusú lapkával esztergált felületen mért profilegyenetlenség magasság (*Rz*) értékei jelentősen meghaladták az elméleti érdesség (*Re*) számított értékeit. Az elméleti érdességet meghatározó Bauer-formula ebben az adattartományban nagy hibával írja le a várható érdességet, ezért használata a vizsgált műszaki műanyagokra nem alkalmas.

6. tézis: Az „A” típusú és a „B” típusú lapkával esztergált felületen mért profilegyenetlenség magasság (*Rz*) értékeit a PA 6, PET, POM C, PEEK műanyagoknál a Brammertz-formula sokkal jobban közelítette, mint a Bauer-formula, ezért a vizsgált adattartományban jól alkalmazható a várható érdesség meghatározására.

7. tézis: Megállapítottam, hogy az alkalmazott esztergálási paraméterekkel (v_c = 400 m/min; f = 0,08-0,315 mm/ford; a = 1-2 mm) a növelt csúcssugarú szerszám („C” lapka) hasonló érdességet állított elő a PA 6, PET, POM C általános rendeltetésű műszaki műanyagoknál. A PEEK nagyteljesítményű műszaki műanyag r_ε = 0,8 mm csúcssugarú késsel történő esztergálásánál fellép egy felületi minőséget rontó jelenség. A forgácsleválás során váltakozva, pulzáló jelleggel, szívós- és rideg nyírási repedésterjedés jön létre a forgácsolási rendszerben. Ennek látható eredménye a pikkelyes jellegű forgácsolt felület. A jelenség a felületi minőség romlásához vezet.

8. tézis: Az átlagos érdesség (*Ra*) mérési eredményeket értékelve a mechanikai tulajdonságok, a változó előtolás és eltérő él-kialakítás („A”, „B”, „C”-típusú lapka) függvényében, megállapítottam, hogy:

a) Létezik olyan esztergálási rendszer, mikor a nagyteljesítményű anyagkategóriába tartozó PEEK esetén mért *Ra* értékek elkülöníthetők a vizsgált általános műszaki műanyagok (PA 6, POM C, PET) esetén tapasztalt trendektől. Az előtolás növelésével, eltérő él-kialakítások („A”, „B” és „C” lapkák) esetén, a golyóbenyomásos keménység,- a folyási feszültség,- a rugalmassági modulus függvényében értékelt *Ra* trendek nem értékelhetők közösen a két anyagcsoport esetén.

b) Shore D keménység függvényében elemezve az *Ra* értékeket megállapítható, hogy a PEEK nem képez kivételt az általános műszaki műanyagok között. Mindhárom él-kialakítás esetén, a legkisebb előtolás mellett (0,08 mm/ford) függetlenség állapítható meg a Shore D értékek és az *Ra* között. Növelve az előtolást, az *Ra* az „A” és „C” él-kialakítás esetén a Shore-D növekedésével szintén nő. „B” lapkával forgácsolt

felületeknél, a növekvő előtolás esetén, a keménység növelése az *Ra* csökkenésével járt.

c) A vizsgált általános műszaki műanyagok esetén – PEEK nélkül - megállapítottam az alábbi törvényszerűségeket:

- az egyes anyagok szakadási nyúlása, rugalmassági modulusa, valamint folyási feszültsége függvényében az *Ra* – növekvő előtolás esetén is – függetlennek tekinthető, a regressziós egyenesek meredeksége nulla.

- az egyes anyaghoz tartozó golyóbenyomásos keménység függvényében, eltérő előtolásoknál megállapított *Ra* trendek függnek a forgácsoló kés kialakításától. „A” „B” és „C” lapka esetén eltérő trendek állapíthatók meg.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A dolgozatban bemutatott kutató munkám alapján a következőkben azokat az összefüggéseket foglalom össze, amelyek tovább bővíthetik ismereteinket, és segítséget jelenthetnek a gyakorlati alkalmazások terén.
A műszaki műanyagok forgácsolt felületének érdességi vizsgálatai az alábbiakra engednek következtetni:

- Összeállítottam egy olyan komplex forgácsolási tervet, amely négyféle műszaki műanyag típusra alkalmazva lehetőséget adott az egyes anyagféleségek esztergálás közbeni viselkedésének vizsgálatára, különös tekintettel a felületi textúra mikrogeometriájára és a forgácsképződésre. Ebből kimutattam, hogy az általam meghatározott vizsgálati tartományban a forgácsoló sebességnek csekély hatása van a vizsgált felületi érdességre, ez alapvetően eltér az acélok forgácsolásánál tapasztaltaktól.
- A kísérleti eredmények abba az irányba mutatnak, hogy a forgácsolás adatkombinációi a felületi érdesség vonatkozásában még pontosíthatók a vizsgált műszaki műanyag féltermékeknél.
- A 2D-s és 3D-s érdességi jellemzők összevetésekor megállapítottam, hogy a mikrogeometriai paraméterek érzékenyebben reagálnak a felület durva egyenetlenségeire, ezért a mikrotopográfiai mérőszámok alkalmazása a felületi minőség meghatározására elengedhetetlen lenne a műszaki gyakorlatban, de a mérőműszerek magas ára és a hosszú mérési folyamatok még gátat szabnak a gyakorlati felhasználában történő elterjedésnek.

A téma által felvetett, további kutatási területeket érintő javaslataim a következőek:

- Az esztergálási kísérletek alapján kapott valós érdességi értékek (*Rz*) jól összevethetők a Brammertz-formulával kapott eredményekkel. Az itt jelentkező hibahatár maximuma egy kiugró értéktől eltekintve a legkisebb előtolásoknál sem haladja meg az 50-60 %-ot. Mindez a Bauer-formuláról nem mondható el. Ezek alapján további vizsgálatokkal célszerű és kívánatos lenne a Brammertz-formulában szereplő $h_{min} = f(v_c,r_n)$ összefüffést műszaki műanyagokra adaptálni, amely várhatóan a formula még pontosabb alkalmazását tenné lehetővé.
- A felületi érdesség vizsgálatánál peremfeltételként kötöttem ki, hogy az érdességi jellemzők magasságirányú paramétereit veszem figyelembe, mivel a műszaki gyakorlatban ez a legelterjedtebb. Jövőbeli feladatként érdemes lenne megvizsgálni további 2D-s és 3D-s paramétereket.
- Az általam összeállított forgácsolási kísérletterv egyélű szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett esztergálásra vonatkozik. Jövőbeli feladatként további forgácsoló eljárásokra kidolgozott kísérletterv javasolt, amely lehetővé tenné a műszaki műanyagok viselkedésének megismerését.

- A forgácsolási kísérleteknél nem vettem figyelembe az idő tényezőt, ezért mindenképpen indokolt a jövőbeli feladatok között szerepeltetni a forgácsolás során az időtartam vizsgálatot.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A gépalkatrészek felületi minőségével szemben támasztott követelmények egyre szigorúbbak lesznek. A felületi minőség jellemzése a műszaki gyakorlatban döntően 2D-s mikrogeometriai mérőszámokkal valósul meg, de már számos kutató munka foglalkozik a 3D-s mikrotopográfiai paraméterek alkalmazhatóságának vizsgálatával. Műszaki műanyagok megjelenése a szerkezeti anyagok között új lehetőségeket kínál mind a termékfejlesztés mind a gyártástechnológia területén. Kutatómunkámban ezért olyan műszaki műanyagok esztergálásával és a forgácsolt felület vizsgálatával foglalkoztam, amelyek eredményei a műszaki gyakorlat számára hasznosak lehetnek.

A szakirodalom áttekintése során száz, hazai és nemzetközi tudományos cikket dolgoztam fel. Összefoglaltam a felület minőségét meghatározó tényezőket továbbá a felületi textúra jellemzésére alkalmazott mikrogeometriai (2D-s) és mikrotopográfiai (3D-s) paramétereket. Ismertettem azokat a jellegzetes mérési eljárásokat, amelyek elterjedtek a felületi érdesség témakörében és a tapintőtűs mérési eljárást valamint az elektronmikroszkópiát részletesen bemutattam, mert ezeket a kutatási munkám során alkalmaztam. A műszaki műanyagok ismertetését végeztem el a 3. fejezetben különös tekintettel a kutatásban alkalmazott négy műanyagféleségre: öntött poliamid 6, poli(etilén-tereftalát), poli(oxi-metilén) és poli(éter-éterketon). Ezután összefoglaltam a műanyag félkésztermékek forgácsoló megmunkálására vonatkozó irodalmat. A fejezet végén kritikai jelleggel utaltam az adott terület hiányosságaira majd a megoldásra váró feladatokra.

Komplex forgácsolási kísérlettervet állítottam össze, melyben az esztergálás paramétereit (v_c, f, a) valamint az alkalmazott esztergakéseket a szakirodalom javaslatai alapján választottam ki. A forgácsolási kísérletekből értékes tapasztalatokat nyertünk a műanyagok esztergálás közbeni viselkedéséről. Egyes műanyagok – mint például a POMC és a PEEK – kifejezetten jól forgácsolhatók, a képződött forgácsalak kedvező, melynek oka a kis hőérzékenység és a kristályszerkezet lehet. A PA6 és a PET forgácsolásakor gyakran gondot okozott a fonalszerű forgács, amely a megmunkálás során az anyagra rátekeredett és kedvezőtlenül befolyásolta a folyamatot. A műanyagok felületi érdességének vizsgálata során kapott eredményekből megállapítható, hogy a forgácsolási sebességnek az érdesség alakulására – a vizsgált tartományban – nincs számottevő hatása, amely eltér az acéloknál tapasztaltaktól. A műanyagok forgácsolása során a felületi simaságot meghatározó *Ra* értékét döntően az előtolás befolyásolta.

A vizsgálataim alapján megfogalmaztam az új tudományos eredményeimet, amelyeket külön tézisfüzetben is összefoglaltam. Végezetül javaslatokat tettem az elért eredmények gyakorlati hasznosítására, és további kutatási feladatok kitűzésére.

SUMMARY

The requirements of the surface quality of the machines parts increase constantly. The characterization of the surface quality occurs mainly with 2D microgeometric parameters in technical practice however a number of research works with the examination of the application of 3D parameters. The appearance of engineering plastics gives new opportunities for product development and production. Therefore in my research I have dealt with turning such engineering plastics and the examinations of cutting surface which results could be useful in engineering practice.

During the reading of the professional literature I have processed hundred national and international scientific publications. I have summarized the determining factors of the surface quality the parameters of 2D mikrogeometric and the parameters of the 3D topographic. I have described the typical measurement processes which are current in the topic of the surface roughness I have also described the stylus scanning instrument and the electronmikroscope in detail because they were used during my study.
I have summarrized the technical polymers such as PA6, PET, POMC, PEEK in part 3. Later I have written the literature of the machined polymers. In the end of the chapter I have named the deficiencies of the given field.

I have made a complex design of experiments of cutting and I have selected the parameters of the cutting related to the various publications. We have got valuable experience from the cutting and behavior of the polymers in the process of cutting. Some polymers were cutted very good (e. g. POMC and PEEK). The form of chip was good because of the low thermal sensitivity and the structure of crystal. In the cuors of cutting of PA6 and PET there were often a problem caused by the threadlike cutting chips, which the coils on the material and has bad effect on the process.
The results of the cutting surfaces of polymers show that the cutting speed has not effect on the surface roughness and it is contrary with the experience of the metal cutting. The value of *Ra* have desicively influenced by the feed rate.

I have formulated my new scientific results which are summarized in an individual thesis booklet. Finally I have made suggestions for the empirical usage of the results and for further research tasks.

MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Abouelatta, O. B., Mádl, J.: Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations is turning operations, *Journal of Materials Processing Technology,* 2001 pp. 269-277

2. Angyal B., Dobor Lné., Palásti K. B., Sipos S.: A forgácsolás és szerszámai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1988, 160-173 o.

3. Antal Gy., Fledrich G., Kalácska G., Kozma M.: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Mineva-Sop., Budapest 1997, 62-100 o.

4. ASME B46.1-2002: Surface texture (surface roughness, waviness, and lay) 2002.

5. Beno, J., Manková, I., Palásti-Kovács, B., Farkas, G.: Consideration to the Machined Surface Formation, Science Report, Kielce University of Technology (Ed. by S. Adamczak, P.H. Osanna), Kielce 2006, pp. 55-64

6. Blateyron, F.: 3D Parameters and New Filtration Techniques, Quality magazine, White Paper, May 15 2007.

7. Blau, P. J.: The significance and use of the friction coefficient, *Tribology International* 34, 2001, pp. 585-591

8. Bollók P., Palásti K. B., Pálinkás T.: Friction wearing tester for testing rubbing surfaces, Gépészet 2006., 5th conference on mechanical engineering, Budapest 2006

9. Bushan, B.: Modern Tribology Handbook, CRP Press LLC, Boca Raton, London, New York, Washington D. C. 2001, pp. 125-235

10. Buzási Lné: Műanyagok alkalmazási lehetőségei az autóiparban I., *Műanyag és Gumi*, Budapest 2003/40. évfolyam, 6. szám, 184-188 o.

11. Buzási Lné: Műanyagok alkalmazási lehetőségei az autóiparban II., *Műanyag és Gumi*, Budapest 2003/40. évfolyam, 7. szám, 227-231 o.

12. Buzási Lné: Műanyagok alkalmazási lehetőségei az autóiparban III., *Műanyag és Gumi*, Budapest 2003/40. évfolyam, 8. szám, 264-266 o.

13. Csanády Á., Kálmán E., Konczos G.: Nanoszerkezetű anyagok, egyetemi jegyzet, Budapest 2004, 183 o.

14. Czifra, Á., Palásti K., B., Farkas, G.: Tribological behaviour of machined surfaces, The 6th International Scientific Conference, development of metal cutting DMC, Kosice 2007, pp. 1087-1098

15. Czifra Á., Váradi K., Palásti K. B.: A felületi mikrotopográfia vizsgálata szeletelő módszerrel kerámia-acél csúszópár esetén, *Gép*, Budapest LVI. évfolyam, 2005. 9-10. szám, 13-16 o.

16. Czigány T., Czvikovszky T.: Polimerek és kompozitjaik járműipari alkalmazása - áttekintés, *Műanyag és Gumi*, Budapest 2003/40. évfolyam, 8. szám, 45-50 o.

17. Degner, W.: A forgácsolószerszámok éllekerekítésének jelentősége, II. Szerszámanyagok és szerszámok Konferencia, Budapest 1971.

18. Djacsenko, P. E.: Kacsesztvo poverhnosztyi gyetalej masin, Akad. Nauk, Moszkva 1959.

19. Drága Zs.: A szálerősítéses műanyagok alkalmazása a járműiparban, *Gép*, Budapest LIV. évfolyam, 2003/10-11. szám, 21-23 o.

20. Dudás, I., Varga, Gy.: 3D Topography for Environmentally Friendly Machined Surfaces, *7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics*, Conference Series 13 2005, pp. 24-27

21. Eleőd A.: Tervezés tribológiai szempontok figyelembe-vételével, *Gépgyártástechnológia*, Budapest 1998/1. szám, 2-9 o.

22. Enache, S.: La qualité des surfaces usinées, Dunod – Paris 1972.

23. Farkas G., Horváth S. (a): Műszaki felületek mikrotopográfiai vizsgálata, X. FMTÜ, Kolozsvár 2005, 251-254 o.

24. Farkas, G., Czifra, Á., Palásti, K. B., Horváth, S. (b): Műszaki felületek mikrogeometriai vizsgálatában alkalmazott 2D-s és 3D-s paraméterek összevetése, információtartalmuk elemzése, *Gép*, LVI. évf. 2005/2-3. szám, 51-59 o.

25. Farkas G., Palásti K. B., Kalácska G. (c): Műszaki felületek mikrogeometriai vizsgálata, MTA Agrárműszaki Bizottság, XXIX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő 2005, 3. kötet 113-117 o.

26. Farkas, G., Palásti, K. B.: Forgácsolt műszaki műanyagok felületi simasága, *Gépgyártás*, XLVI évfolyam, 2006/5. szám, 6-10 o.

27. Farkas, G.: A megmunkálási körülmények hatása a felületi mikrogeometriára műszaki műanyagok esztergálásakor, *Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek*, 2007/1. szám, 9-12 o.

28. Farkas, G., Kalácska G. (a): Felületi mikrogeometria vizsgálata forgácsolással megmunkált műanyagok esetén. *Gép*, LVIII. évfolyam, 2007/4. szám, 7-12 o.

29. Farkas, G., Palásti K., B. (b): A forgácsolási paraméterek hatása a felületi mikrogeometriára műszaki műanyagok esztergálásakor. Anyagok világa/Materials World, VII. évfolyam 2007/1. szám

30. Füzes L., Kelemen Ané: Műszaki műanyagok zsebkönyve. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1989, 182-362 o.

31. Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., Soliman, H. H.: Roughness Parameters, *Journal of Materials Processing of Technology*, 2002 pp. 133-145

32. Gulyás A.: Keményfém váltólapkák éllekerekedésének kísérleti vizsgálata esztergálásnál, Szakdolgozat, Budapest 1984, 68-72 o.

33. Harmath J., Pálinkás T.: Elektronika a gépipari hosszméréstechnikában. Rádiótechnika Évkönyv, Budapest 1994, 71-85 o.

34. Horváth S.: A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése, PhD értekezés, Budapest 2008. 12-30 o.

35. Horváth, S., Czifra, Á.: The importance of waviness in study of microtopography of cutting surface, DMC 2005. *The 5th International Scientific Conference, Development of Metal Cutting*, Kassa, 12-13 September 2005., pp. H 1-4

36. ISO 1302:2002 Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation.

37. ISO 4287:1997 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definition and surface texture parameters.

38. ISO 4288:1996 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture.

39. ISO/DIS 25178-2 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. 2007.

40. ISO/DIS 25178-3 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal. Part 3: Specification operators. 2008.

41. Iszajev, A. J.: A felületi rétegképződés folyamata a fémek forgácsolása során, Akadémia Kiadó, Budapest 1953.

42. Jensen, M. F., Christensen, L. H., Prichystal, J., Kjeldsteen, P., Benzon, M. E.: Evaluating the 3D-Topography of Engineering Surfaces, Stucture magazine 39 2001, pp. 3-7

43. Kalácska G.: Műszaki műanyag féltermékek forgácsolása. Quattroplast Kft. Gödöllő 2005, 5-17 o.

44. Kalácska G., Farkas G.: Forgácsolt műszaki műanyagok felületi érdességének vizsgálata, *Műanyag és Gumi*, 44. évfolyam, 2007/10. szám, 419-423 o.

45. Kalácska G., Keresztes R., Eberst O., Pop S., Partick D. B.: Műszaki műanyag fogaskerekek abráziós kopásának kutatása, MTA Agrárműszaki Bizottság, XXX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2006/3. kötet, 186-189 o.

46. Kálmán E., Nagy P., Csanády Á., Papp K., Csorbai H. K., Hunyadi Cs., Telegdi J.: AFM and SEM: Competing or Complementary Techiques, Mat. Sci. Forum 2003, pp. 414-415, pp. 240

47. Kayahan, E., Oktem, H., Hacizade, F., Nasibov, H., Gundogdu, O.: Measurement of surface roughness of metal using binary speckle image analysis, Tribology International 2010, pp. 307-311

48. Kemény S., Deák A.: Kísérletek tervezése és értékelése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2002, 170-179. 341 o.

49. Kim, H. Y., Shen, Y. F., Ahn, J. H.: Development of surface roughness measurement system using reflected laser beam, *Journal of Materials Processing Technology* 130-131, 2002, pp. 662-667

50. Kónya L., Váradi K.: PEEK kopásának kísérleti és numerikus vizsgálata a kúszás figyelembe vételével, *Műanyag és Gumi*, 2004/41. évfolyam, 12. szám, 494-498 o.

51. Kónya L.: PEEK/acél csúszópár kopásának szimulációja a hőfejlődés figyelembe vételével, PhD értekezés, Budapest 2005, 32-40 o.

52. Kovács K., Palásti K. B. (a): Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel. I. A háromdimenziós topográfiai paraméterek áttekintése, *Gépgyártástechnológia*, 1999/9. szám, 31-38 o.

53. Kovács K., Wiezl Cs. (b): Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméteres és képi módszerekkel. *Jubileumi Tudományos Konferencia*, Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest 1999, 345-350 o.

54. Kovács K., Váradi K., Palásti K. B.: Microtopographic Analysis of Technical Surfaces by 3D Parameters, *Gépészet 2000, Second Conference on Mechanical Engineering*, Budapest 2000., Vol. 1, pp. 235-240

55. Kozma M.: Tribológia, Műegyetem Kiadó, Budapest 1994, 15-58 o.

56. Kozma M.: Műanyag csaágyak kenése, *Műanyag és Gumi*, 34. évfolyam, 1997/3. szám, 83-39 o.

57. Kozma M., Forányi F.: Polimer csapágyperselyek összehasonlító vizsgálata, *Gép*, LV. évfolyam, 2004/10-11. szám, 92-95 o.

58. Kozma M., Forányi F.: Hőre keményedő műanyagok súrlódási és kopási jellemzői, *Műanyag és Gumi*, 2005/42. évfolyam, 11. szám, 422-427 o.

59. Lee, B. Y., Juan, H., Yu, S. F.: A study of computer vision for measuring surface roughness in the turning process, The International journal of Advanced manufacturing technology 19, London 2002, pp. 295-301

60. Liu, K., Melkote, S. N.: Effect of plastic side flown on surface roughness in micro-turning process, I*nternational Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 2006, pp. 1778-1785

61. Mahr Gesamtkatalog: Fertigungsmeβtechnik – Systeme, Mahr GmbH, Göttigen 1998, pp. 11-23

62. Maňková, I., Beňo, J., Marková, G., Melcher, M.: Assessment of surface roughness produced by turning and grinding, *MicroCAD 2006 International Scientific Conference*, Miskolc 2006, pp. 203-209

63. Maros Zsolt: vízsugárral vágott felület érdessége, *Gép*, LV. évfolyam, 2004/4. szám, 19-22 o.

64. Nassirpour, F., Wu, S. M.: Statistical evaluation of surface finish and its relationship to cutting parameters in turning, *International Journal of Machining tools*, 1977/4., pp. 197-208

65. Olsen, K. V., Rasmussen, M.: Auswertung der Oberflächenrauheit beim Drehprozess durch die Technologie, Fertigungstechnik und Betrieb, 1970/8., pp. 489-493

66. Palanikumar, K., Mata, F., Paulo Davim, J.: Analysis of surface roughness parameters in turning of FRB tubes by PCD tool, *Journal of Materials Processing of Technology*, 2008, pp. 469-474

67. Palásti K. B.: Forgácsolással megmunkált felületek mikrogeometriájának értékelése, Kandidátusi értekezés, Budapest 1983, 1-35 o.

68. Palásti K. B.: Gépalkatrészek minősége. Tervezés, gyártás, minősítés. BMF BGK, Főiskolai jegyzet, Budapest 2001, 10-25 o.

69. Palásti K. B., Czifra, Á. (a): Forgácsolt felületek mikrogeometriája és mikrotopográfiája. *Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek*, 2002/2. 67-71 o.

70. Palásti, K. B., Czifra, Á., Kovács, K. (b): Microtopography of machined surfaces, tribological aspects of surface and operation, *DMC 2002 The 4th International Scientific Conference Development of Metal Cutting*, Kassa 2002, pp. 50-57

71. Palásti K. B., Czifra Á., Horváth S.: A kopás és a 3D-s felületi érdesség (mikrotopográfia) összefüggései, *Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek*, 2007/2. szám, 73-77 o.

72. Palásti K., B., Farkas, G.: Relationship between the cutting surface-microgeometry and it's evaluation, The 5th International Scientific Conference, development of metal cutting DMC, Kosice 2005, pp. H 15

73. Palasti K., B., Farkas, G. (a): Contribution to the Evaluation of Machined Surface Microgeometry. Production Process in Mechanical Engineering - Research Reports, Cracow-Košice 2006, pp. 113 -120

74. Palásti K., B., Farkas, G., Maňková, I., Beňo, J. (b): Contribution to the Evaluation of Machined Surface Mikrogeometry. Science Report, Kielce 2006, pp. 217-226

75. Palásti K. B., Kovács K.: A felületi topográfia kialakulására és változására ható tényezők a tribológia tükrében. *Gépgyártástechnológia*, 1998/4. szám, 15-17 o.

76. Palásti K. B., Kovács K., Pálinkás T., Váradi K.: A topoSurf, 3D-s érdességmérő műszer, *Műszerügyi és méréstechnikai közlemények*, 2001/68. szám, 43-52 o.

77. Pekelharing, A. J., Luttervelt, C. A.: Wear of finish turning tools, Seminar of metall cutting, Paris 1966.

78. Pék L.: Fémes és nemfémes szerkezeti anyagok, Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar Egyetemi jegyzet, Gödöllő 2000, 31-87 o.

79. Perthometer C3A: Felület és alakmérő berendezés, Kezelési utasítás, Hannover 2003

80. Pozsgai I.: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest 1994, 7-35 o.

81. Sagdic, M., Dubbert, F.: Spanende Bearbeitung von Kunststoffen. Bildschirmpresentation, LBK 2002, FSM-02

82. Sander, M.: Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker, Feinprüfung GmbH, Göttingen 1989, pp. 108

83. Sandvik Coromant: CoroPak 09.2. Online szerszámkatalógus, 2009, www.sandvic.coromant.com/hu

84. Sipos S.: Különféle műanyagok esztergálásakor nyert felületek érdességének vizsgálata, Kutatási jelentés, Sandvik Coromant Magyarország Kft., Budapest, 2006

85. Sipos S., Bíró, Sz., Tomoga, I.: A termelékenység és a minőség egyidejű növelése wiper élgeometriával, *Gépgyártás* XLVI. évf., 2006/4. szám, 17-24 o.

86. Southard, G.: High Performance Thermoplastics. Materials, properties and applications. The IAPD Education Committee (2001/Module 5)

87. Stout K. J., Sullivan P. J., Dong W. P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouni H.: The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, Commission of the European Communitties 1993 EUR 15178N, pp. 219-236

88. Szabó F.: A világ műanyagipara I. Európa, *Műanyag és Gumi*, 40. évfolyam, 2003/12. szám, 393-398 o.

89. Szilágyi L.: Gépipari méretellenőrzés. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1977, 353-373 o.

90. Thomas, T. R.: Rough Surface, Imperial Collage Press, London 1998, pp. 225-238

91. Varga Gy.: Környezetbarát megmunkálás 3 dimenziós felülettopográfiája, *Gépgyártás*, XLVI. évfolyam, 2006/1-2. szám, 53-57 o.

92. Vargha V.: A "PET", mint korunk egyik legmodernebb műanyaga, *Műanyag és Gumi*, 2004/41. évfolyam, 1. szám, 34-39 o.

93. Verma, R., Raja. J.: Characterization of engineered surfaces, 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, *Journal of Physics*, Conference Series 13, 2005, pp. 5-8

94. Waikar, R. A., Guo, Y. B.: A comrehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding, *Journal of materials processing technology*, 2008, pp. 189-199

95. Whitehouse, D. J.: Handbook of Surface Metrology, Institute of Pfysics Publishing, Bristol 1994, pp. 749-917

96. Whitehouse, D. J., Vanherck, P., de Bruin, W., van Luttervelt, C. A.: Assesment of surface typology analysis techniques in turning, Annals of the DIRP, 2/1974, pp. 265-280

97. Quadrini, F., Squeo, E. A., Tagliaferri, V.: Machining of glass fiber reinforced polyamide, eXPRESS Polymer Letters Vol. 1, No. 12, 2007 pp. 810-816

98. Quinsat, Y., Sabourin, L., Lartigue, C.: Surface topography in ball end milling process: Decsription of a 3D surface roughness parameter, *Journal of materials processing technology* 195, 2008. pp. 135-143

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált cikk idegen nyelven:

1. Kalacska, G., Farkas, G.: The effect of the different cutting tools on the micro-geometrical surface of engineering plastic, *Sustainable Construction & Design*, 2010 Vol. 1, pp. 102-107

Lektorált cikk magyar nyelven:

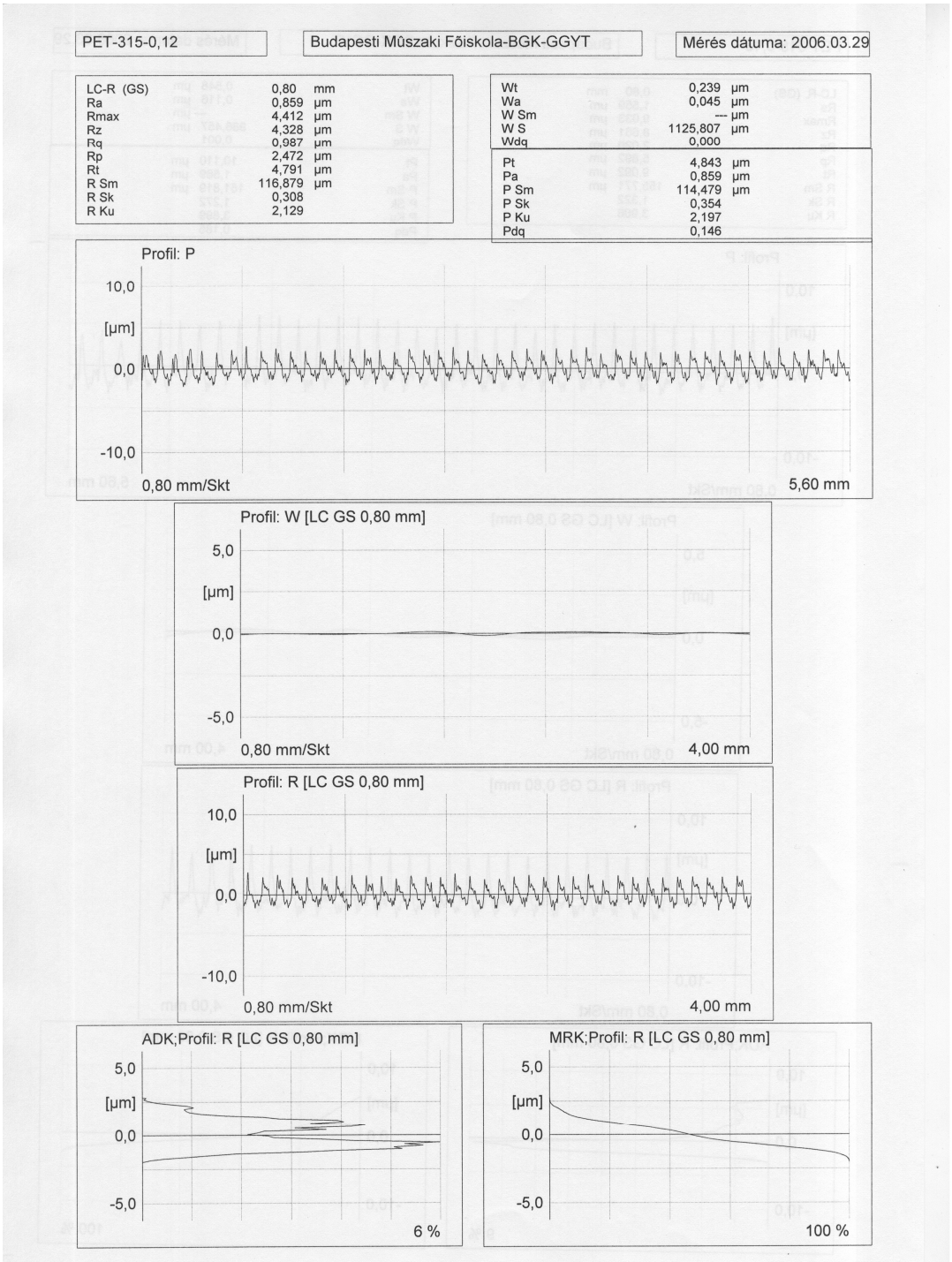
1. Farkas, G.,Czifra, Á., Palásti, K. B., Horváth, S.: Műszaki felületek mikrogeometriai vizsgálatában alkalmazott 2D-s és 3D-s paraméterek összevetése, információtartalmuk elemzése, *Gép*, LVI. évf., 2005/2-3. szám, 51-59 o.
2. Farkas, G., Palásti, K. B.: Forgácsolt műszaki műanyagok felületi simasága, *Gépgyártás*, XLVI évfolyam, 2006/5. szám, 6-10 o.
3. Farkas, G.: A megmunkálási körülmények hatása a felületi mikrogeometriára műszaki műanyagok esztergálásakor, *Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek*, 2007/1. szám, 9-12 o.
4. Farkas, G., Kalácska G.: Felületi mikrogeometria vizsgálata forgácsolással megmunkált műanyagok esetén. *Gép*, LVIII. évfolyam, 2007/4. szám, 7-12 o.
5. Kalácska G., Farkas G.: Forgácsolt műszaki műanyagok felületi érdességének vizsgálata, *Műanyag és Gumi*, 2007/44. évfolyam, 10. szám, 419-423 o.

Nemzetközi konferencia kiadvány:

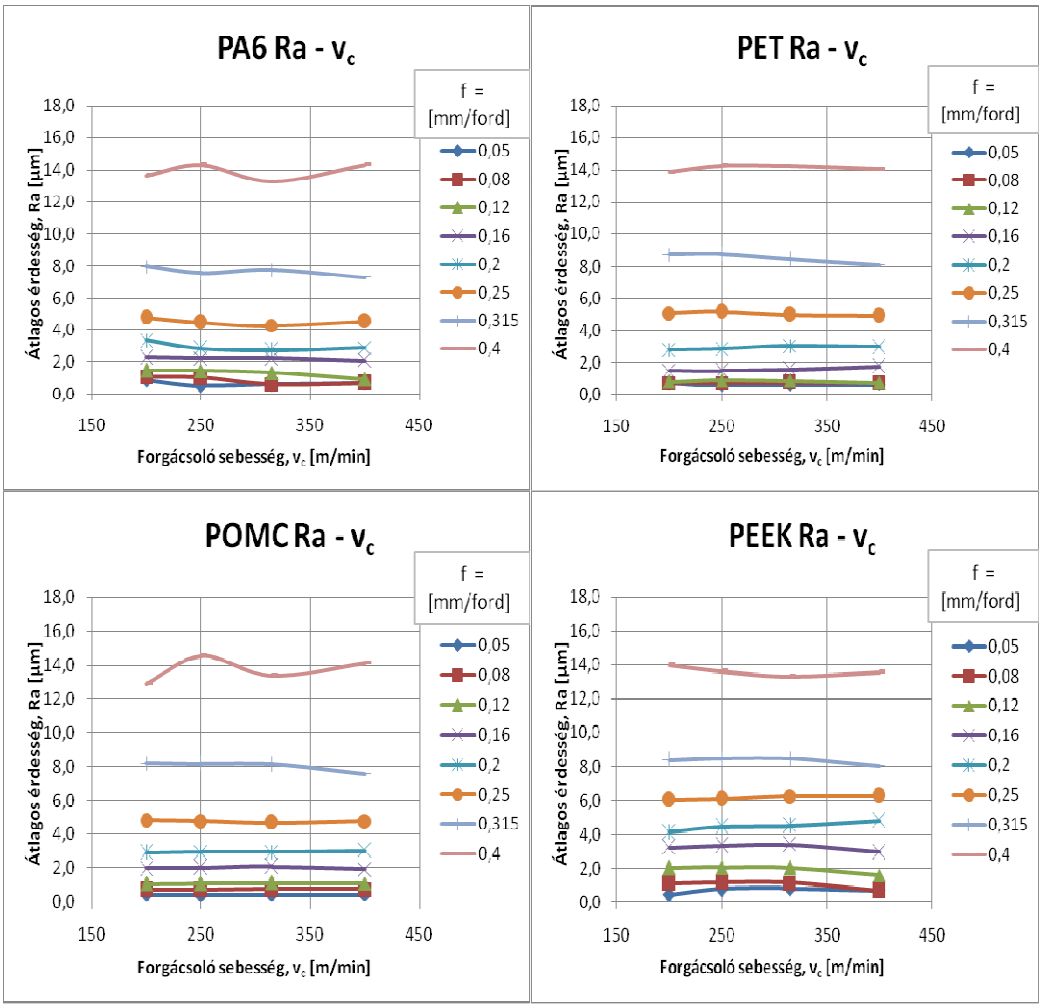
1. Palásti K., B.; Farkas, G.: Relationship between the cutting surface-microgeometry and it's evaluation. The 5th International Scientific Conference, Development of metal cutting DMC, Kosice, 2005. pp. H 15.

   Hivatkozás: Maňková, I., Beňo, J., Marková, G., Melcher, M.: Assessment of surface roughness produced by turning and grinding, microCAD 2006 International Scientific Conference, 16-17 March, Miskolc. pp. 203-209

M3. Mahr Perthen Concept mérőberendezés mérési lapja

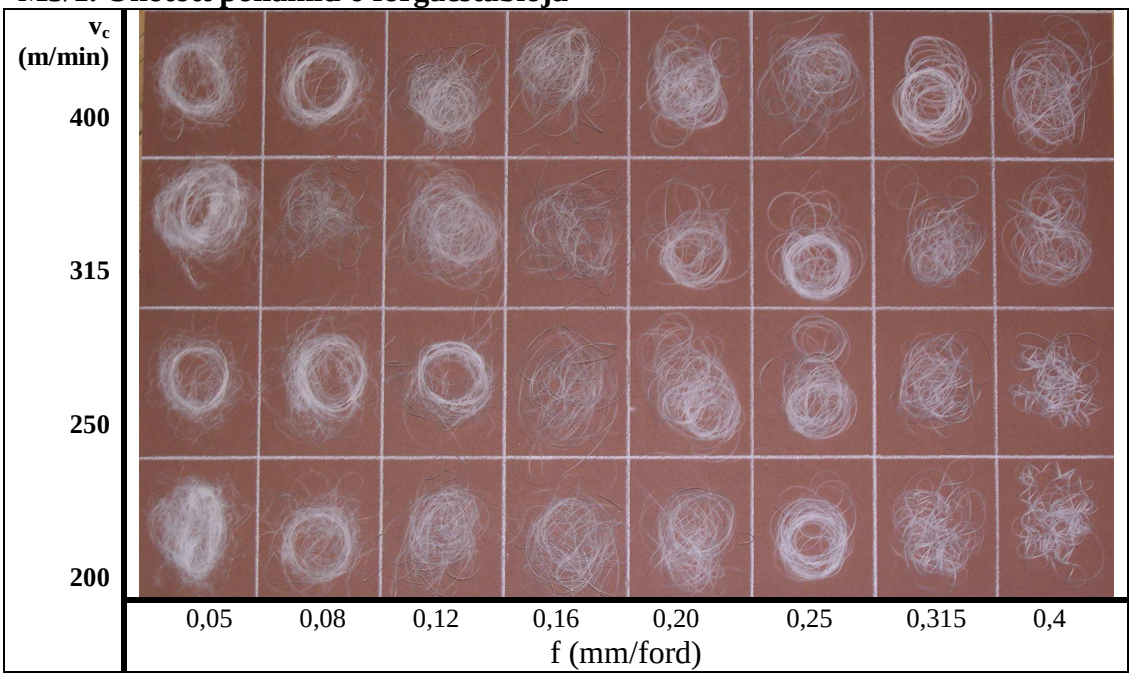


M4. Az átlagos érdesség a forgácsolási sebesség függvényében azonos előtolásokkal és fogásmélységgel PA 6, POM C, PET, PEEK műszaki műanyagok esetén

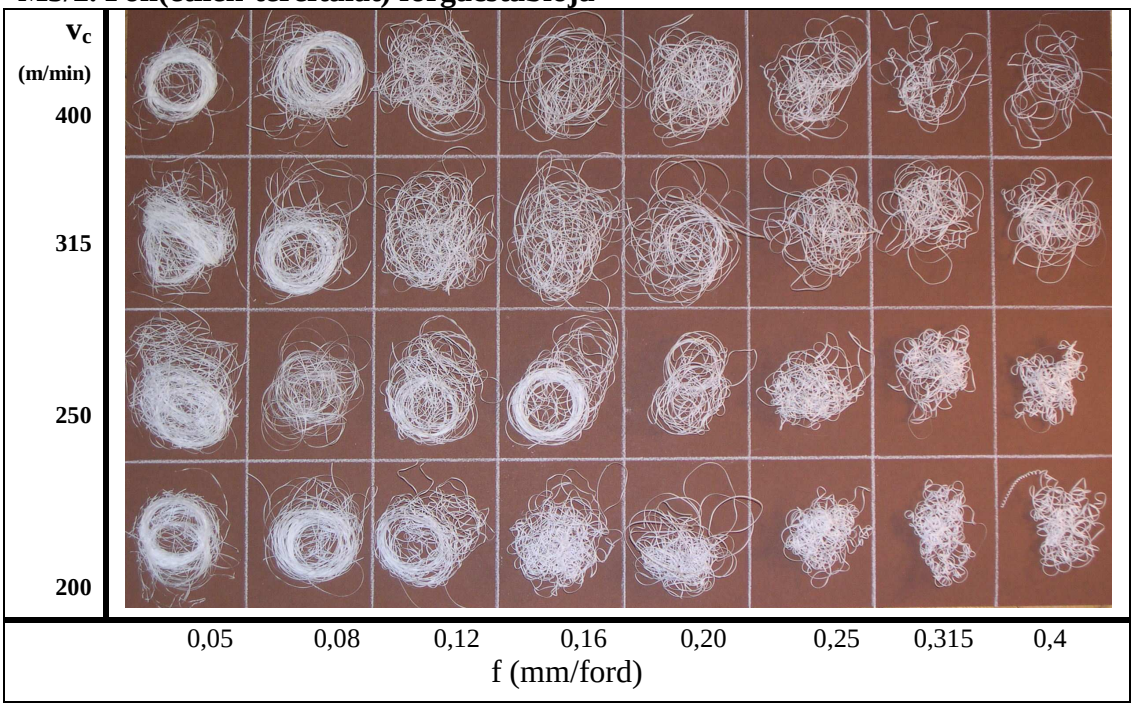


M5. A forgács alakulása a VCGX 110204-AL/H10 lapkával forgácsolva

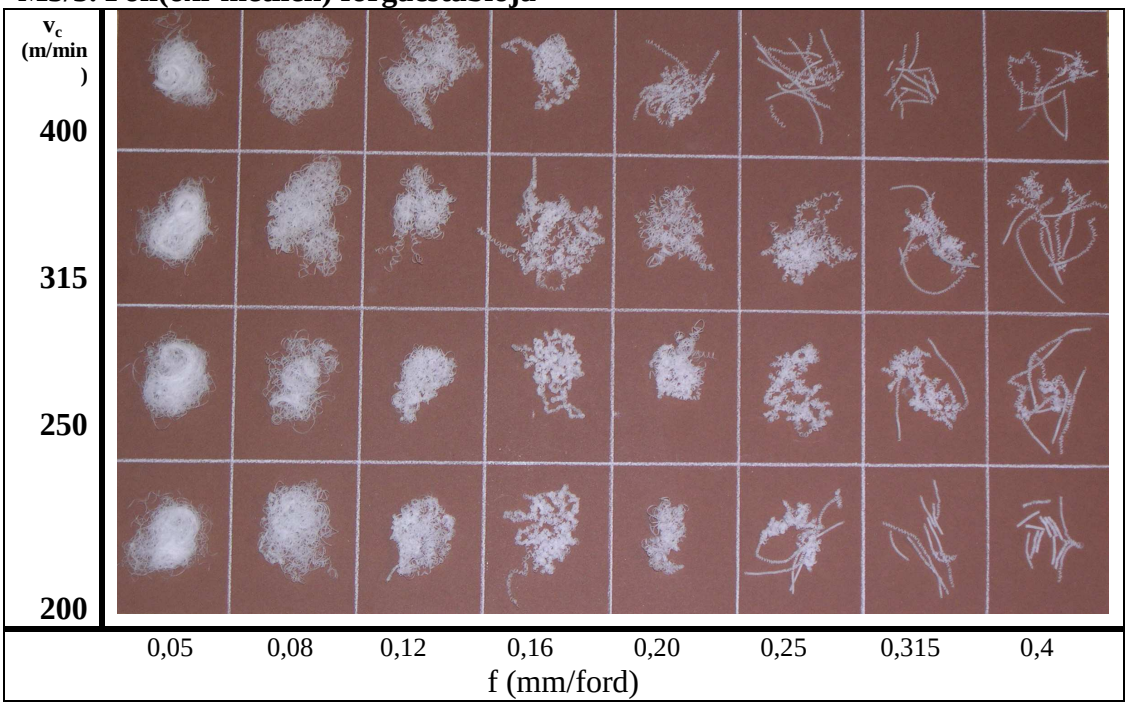
M5/1. Önötött poliamid 6 forgácstablója



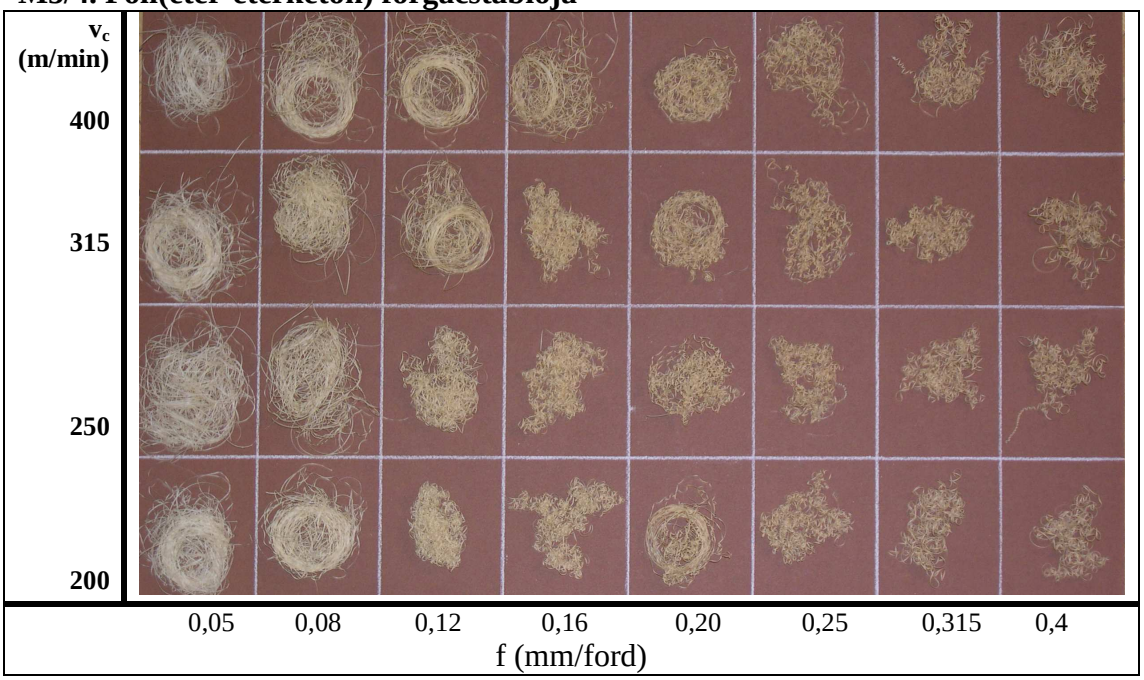
M5/2. Poli(etilén-tereftalát) forgácstablója



M5/3. Poli(oxi-metilén) forgácstablója

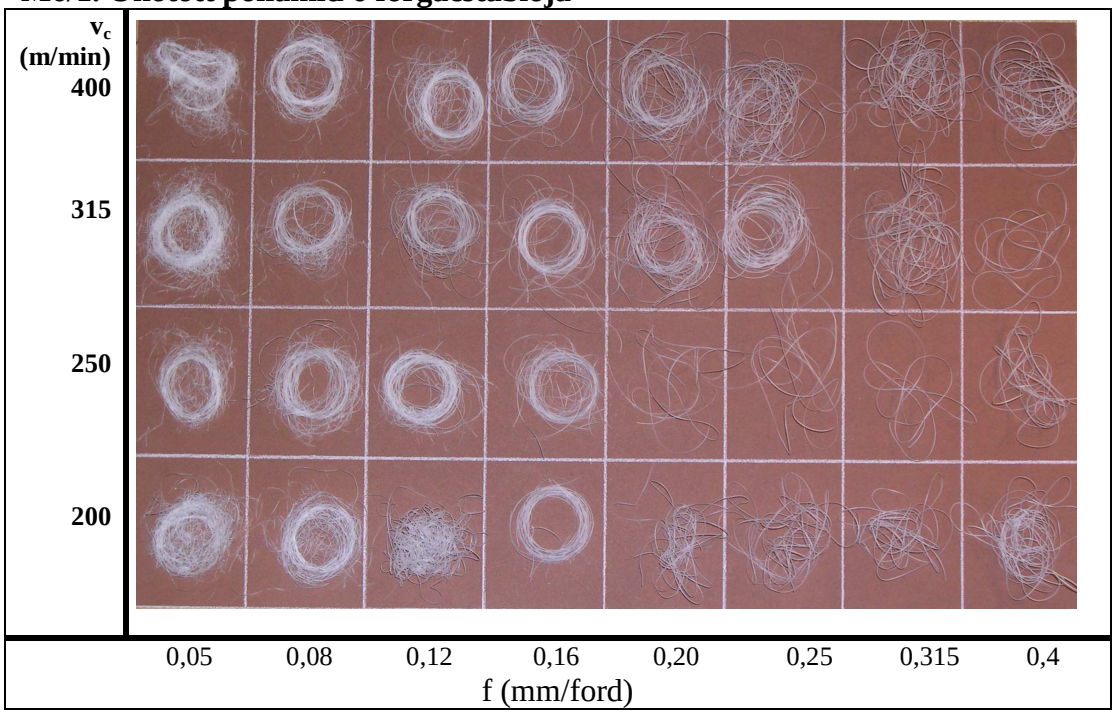


M5/4. Poli(éter-éterketon) forgácstablója

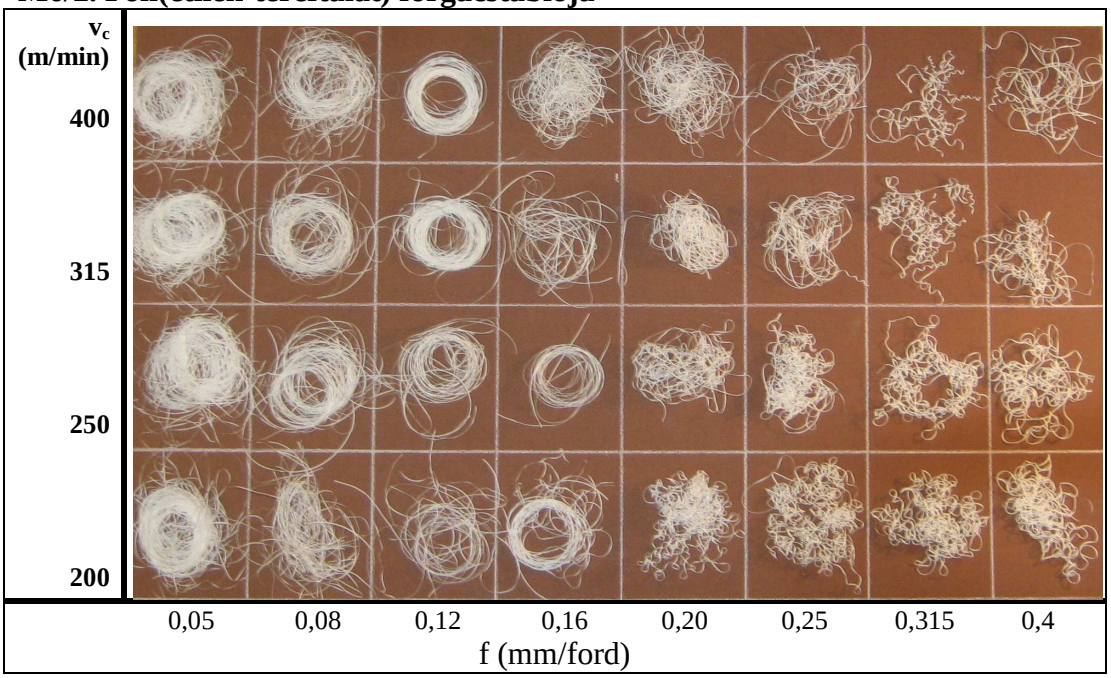


M6. A forgács alakulása a DCGX 11T304-AL/H10 lapkával forgácsolva

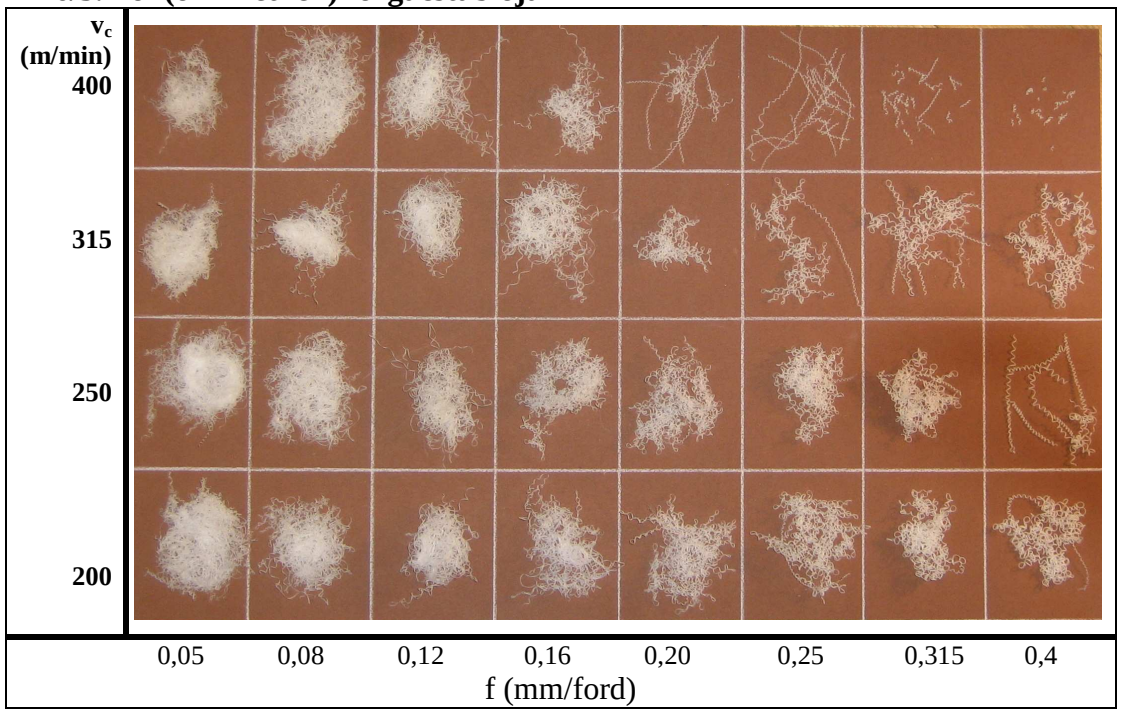
M6/1. Önötött poliamid 6 forgácstablója



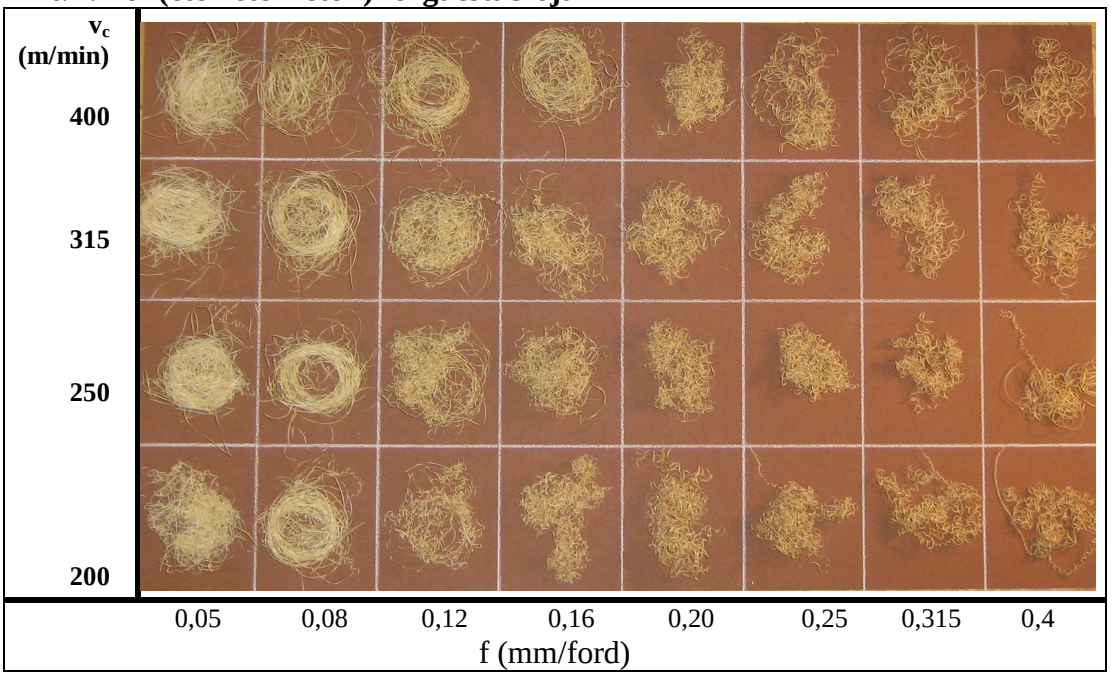
M6/2. Poli(etilén-tereftalát) forgácstablója



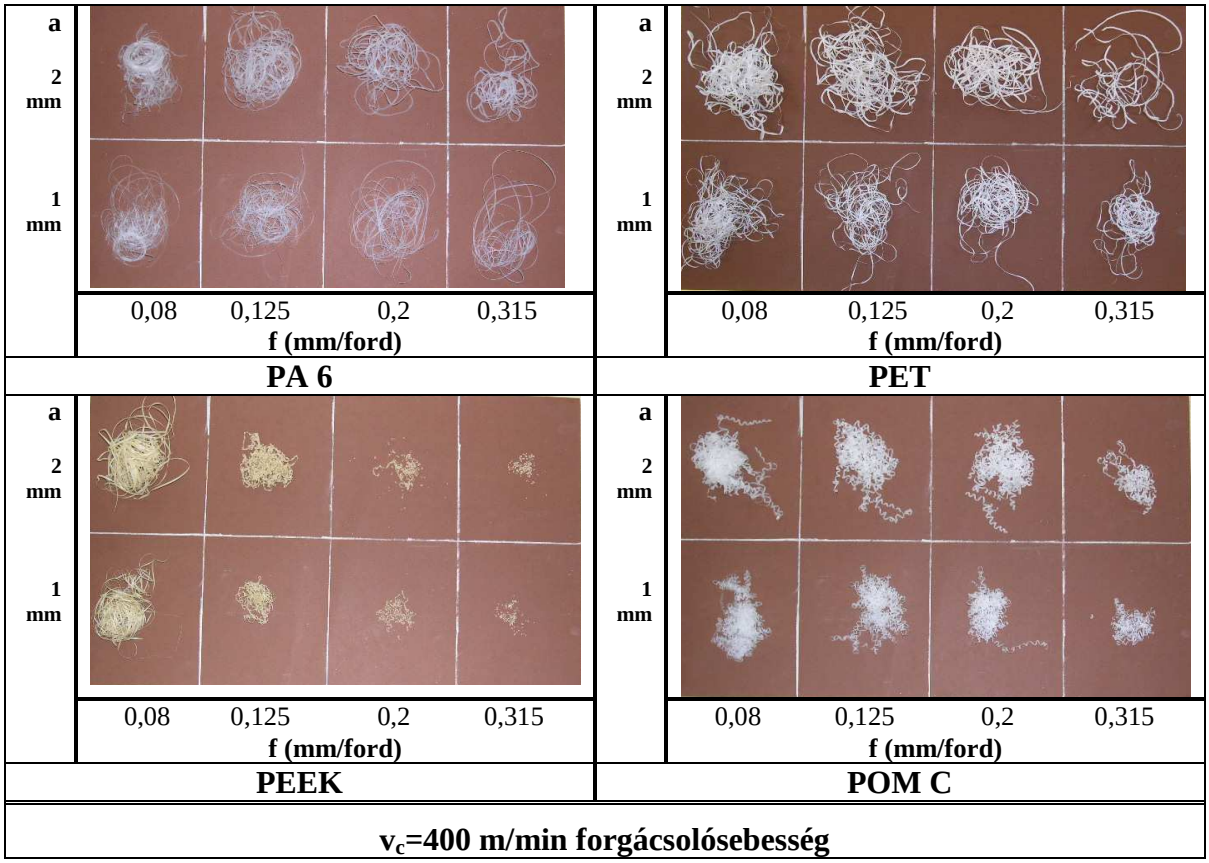
M6/3. Poli(oxi-metilén) forgácstablója



M6/4. Poli(éter-éterketon) forgácstablója

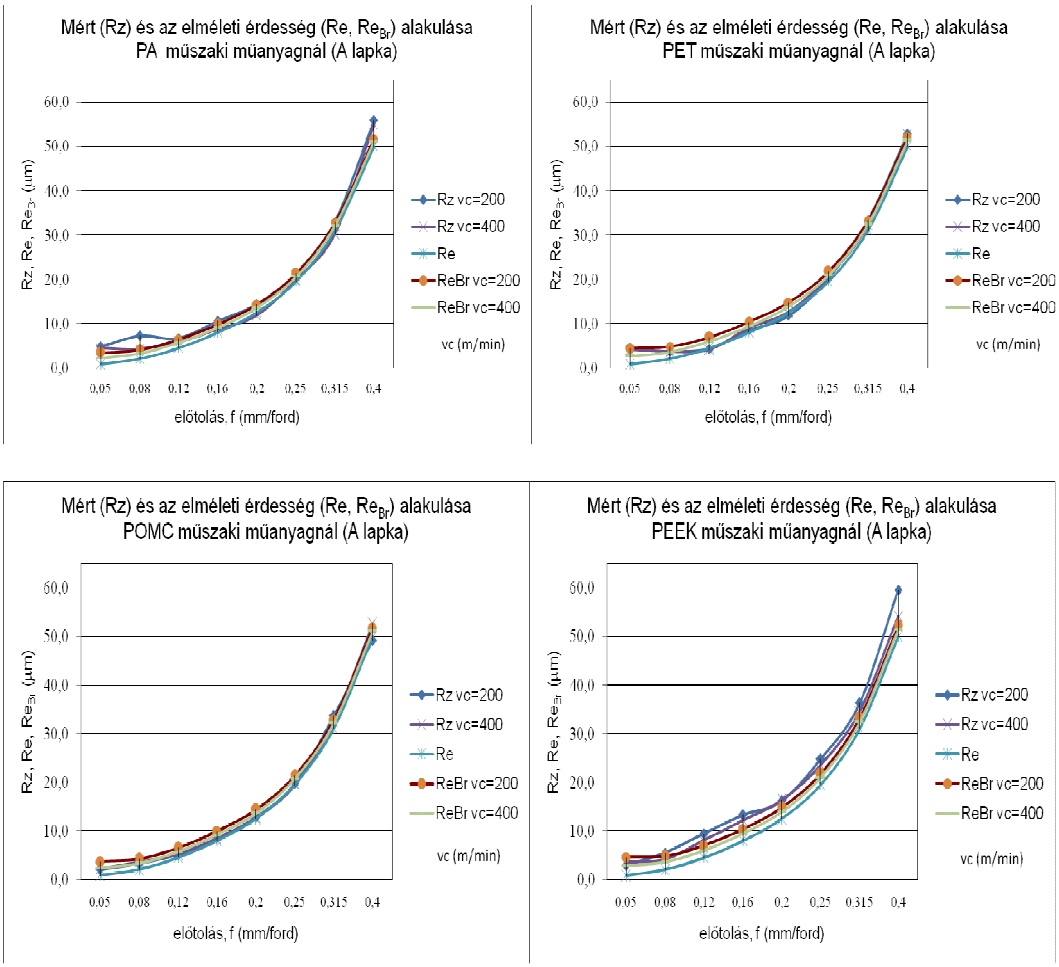


M7. A forgács alakulása a VCGX 11T308-AL/H10 lapkával forgácsolva



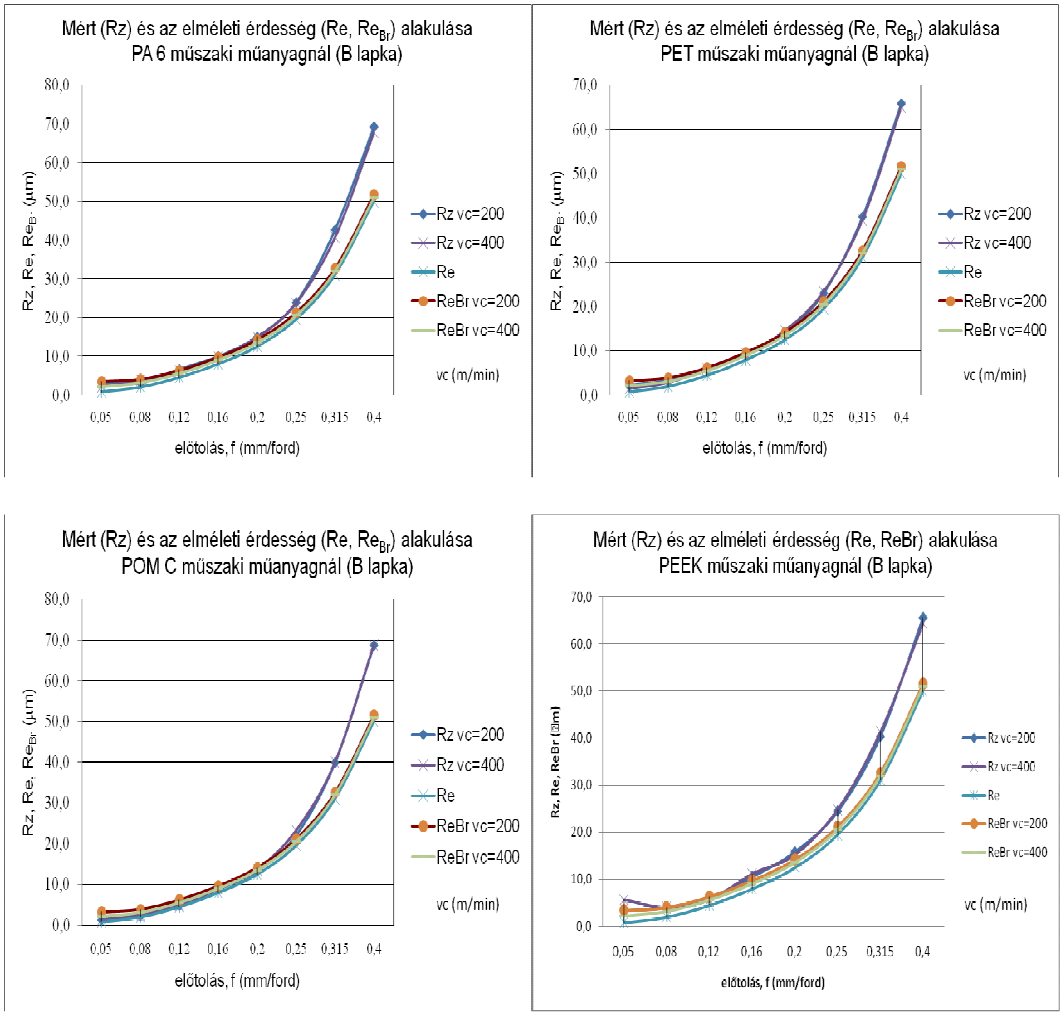
M8. A várható érdesség alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál

M8/1. A várható érdesség alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál „A” lapkatípus esetén



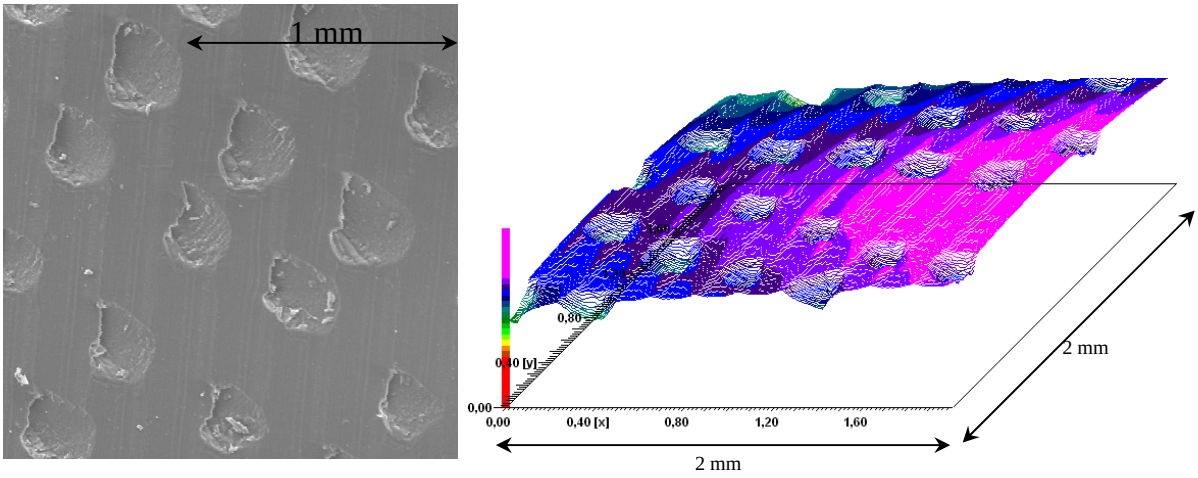
M8.1. ábra. Az elméleti érdesség (*Re, Re*$_{Br}$) és a mért érdesség (*Rz*) alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál (PA 6, PET, POM C, PEEK), A lapkatípus esetén

M8/2. A várható érdesség alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál „B” lapkatípus esetén

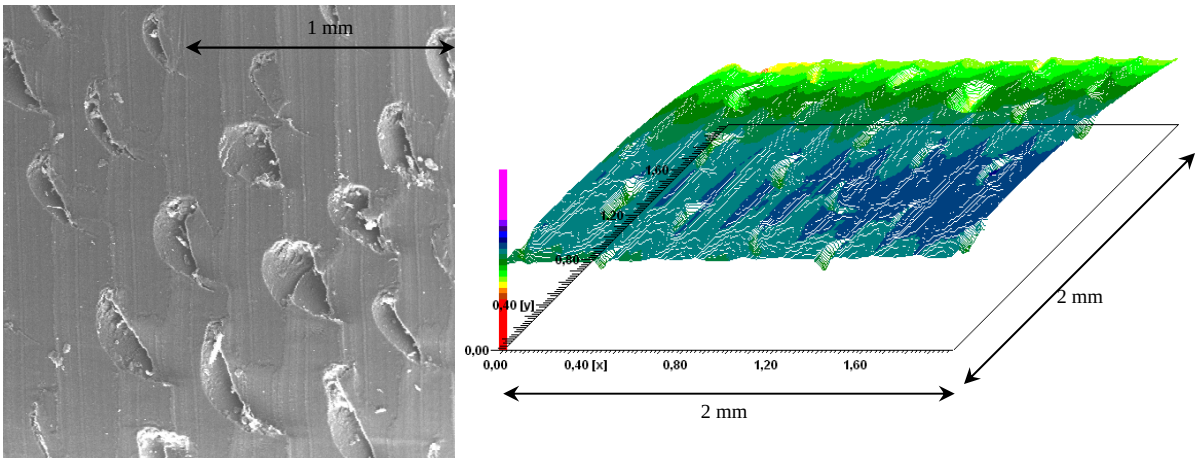


M8.2. ábra. Az elméleti érdesség (*Re, Re*$_{Br}$) és a mért érdesség (*Rz*) alakulása a vizsgált műszaki műanyagoknál (PA 6, PET, POM C, PEEK), B lapkatípus esetén

M9. PEEK esztergált felületének SEM képe és topográfiája

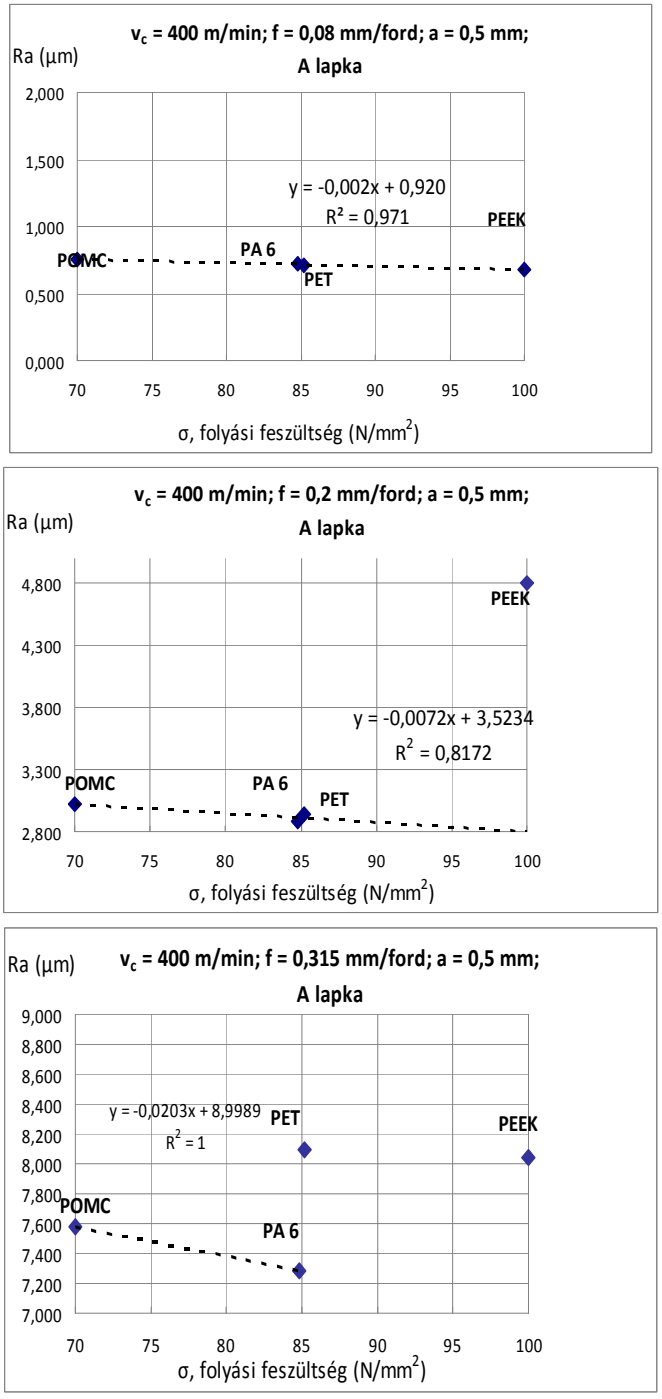


M9.1. ábra. Esztergált PEEK műanyag felületének SEM képe és topográfiája
(v_c = 400 m/min; f = 0,2 mm/ford; a = 1 mm)

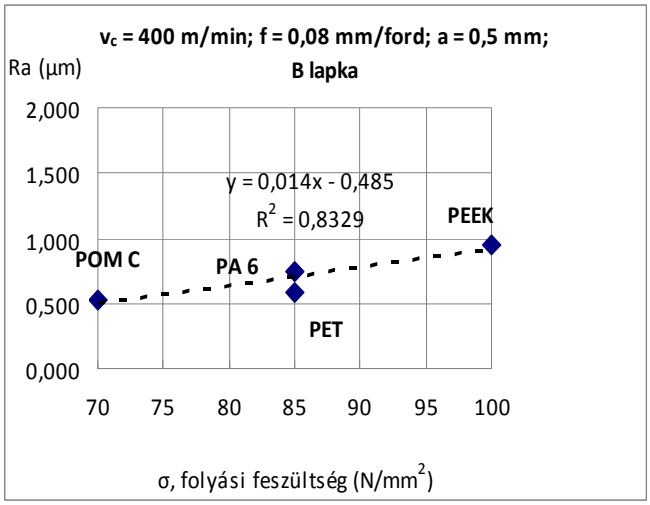


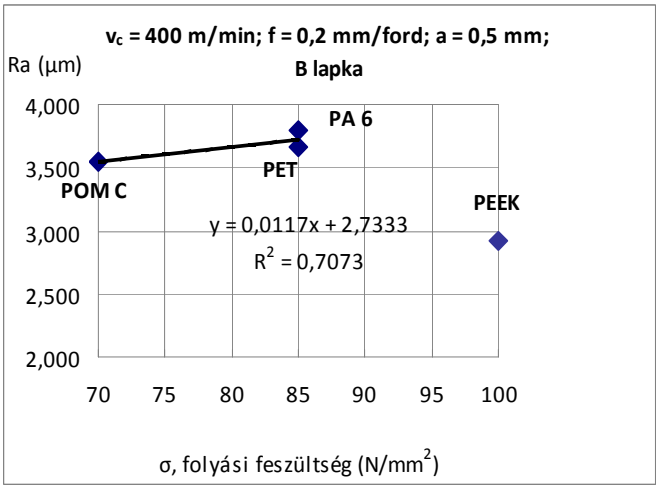
M9.2. ábra. Esztergált PEEK műanyag felületének SEM képe és topográfiája
(v_c = 400 m/min; f = 0,2 mm/ford; a = 2 mm)

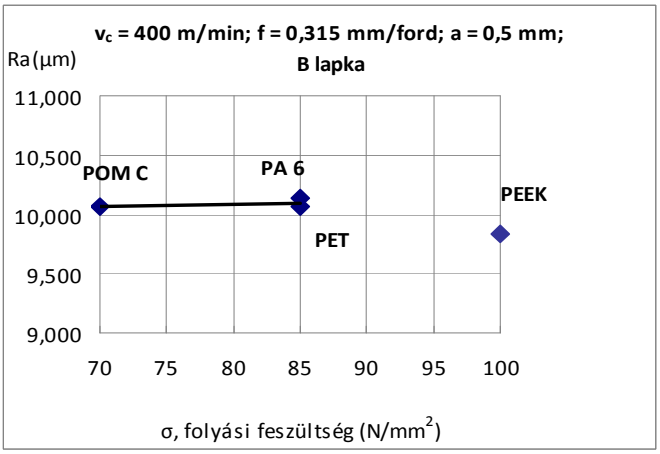
M10. Az átlagos érdesség alakulása a mechanikai jellemzők függvényében műszaki műanyagoknál



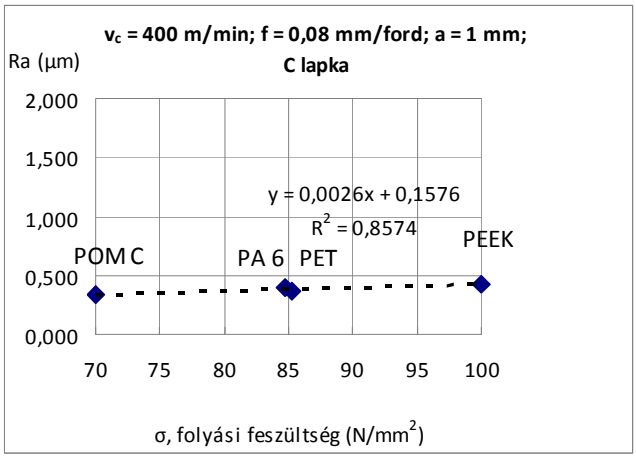
M10.1. ábra. Átlagos érdesség a folyási feszültség függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

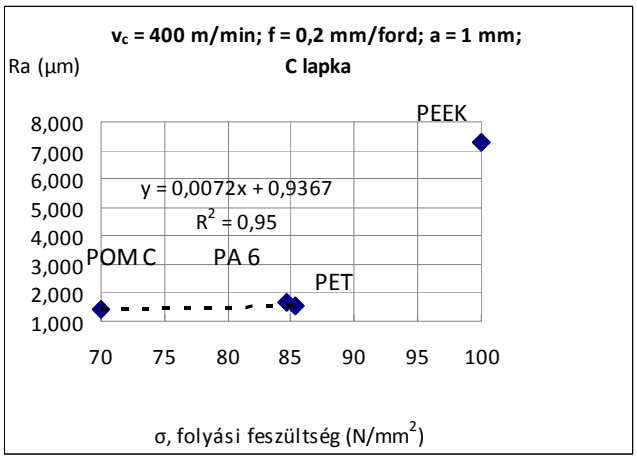


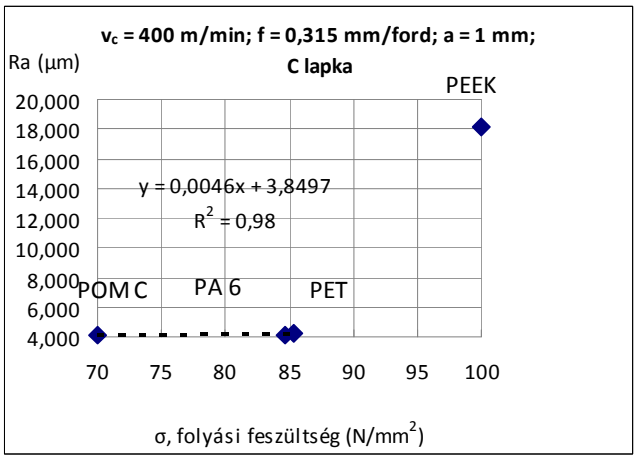




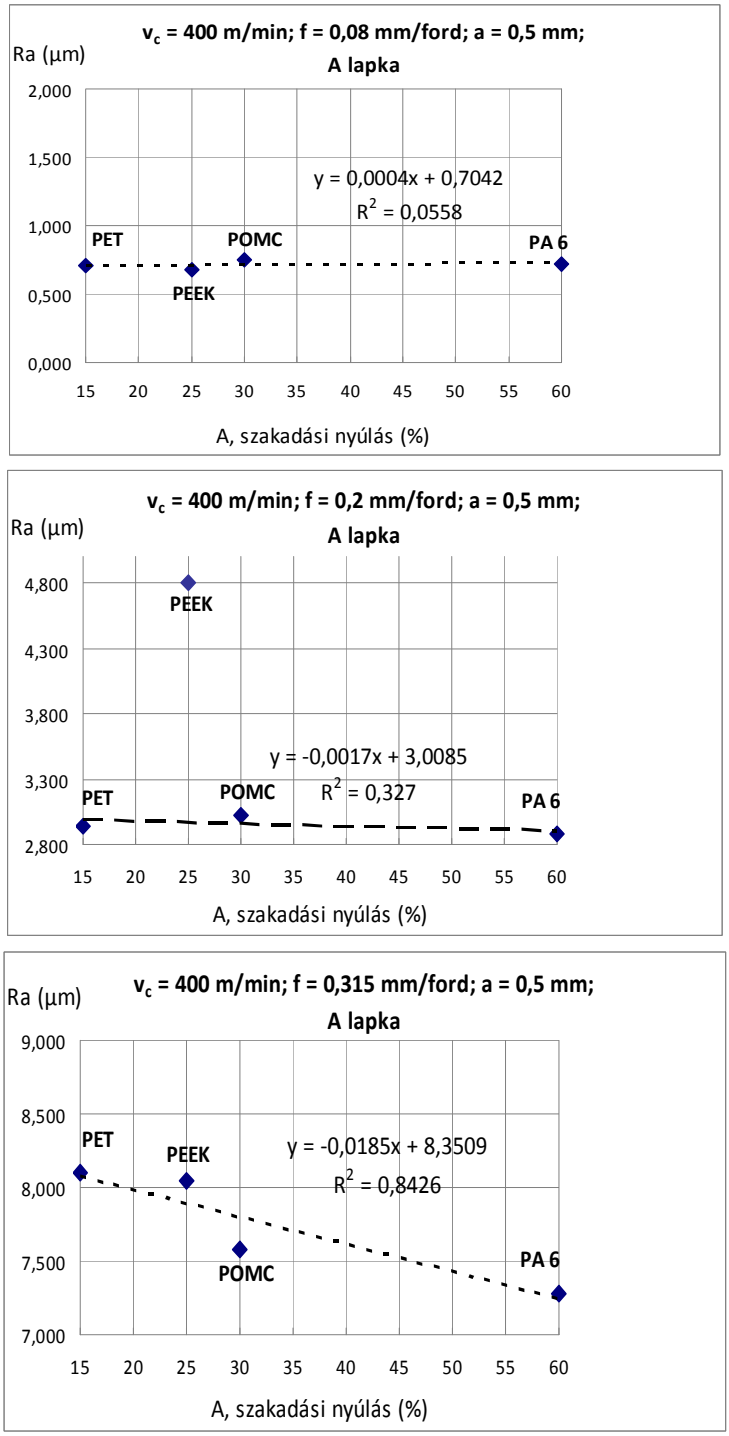
M10.2. ábra. Átlagos érdesség a folyási feszültség függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)



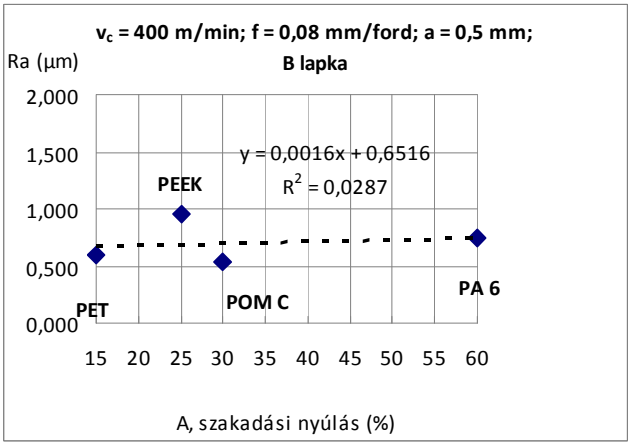


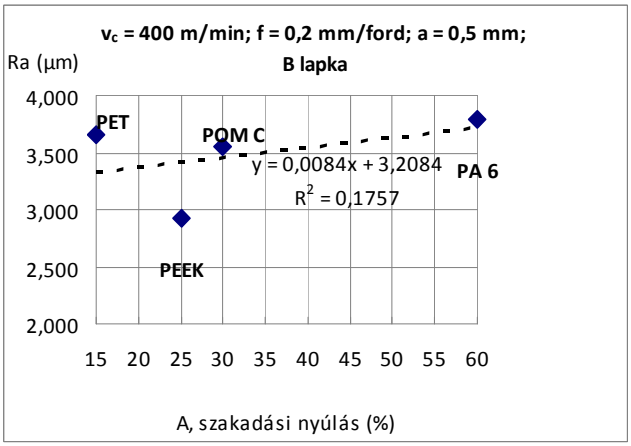


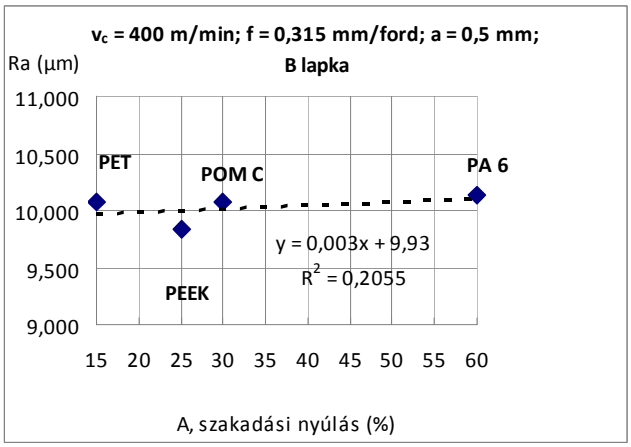
M10.3. ábra. Átlagos érdesség a folyási feszültség függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)



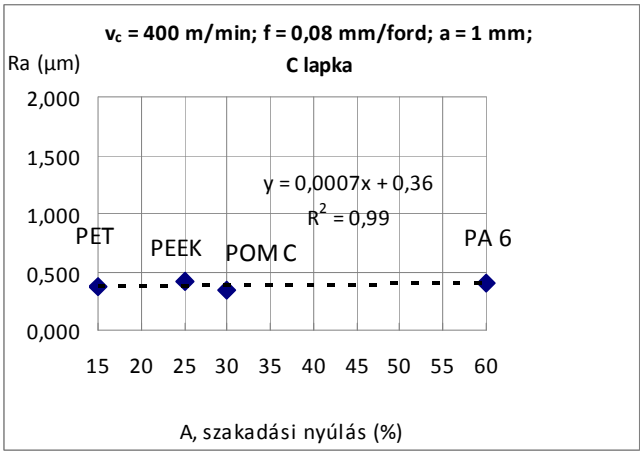
M10.4. ábra. Átlagos érdesség a szakadási nyúlás függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

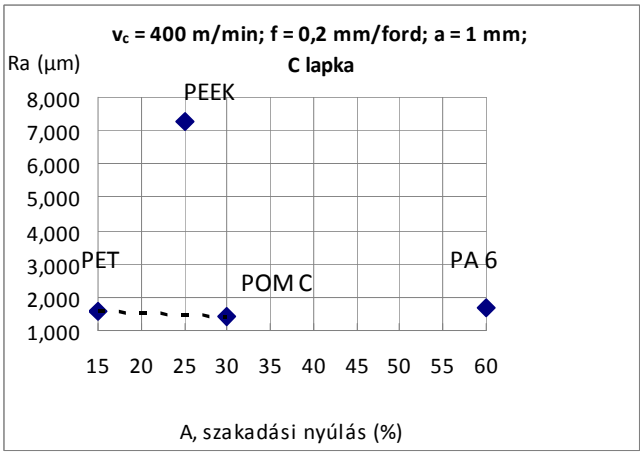


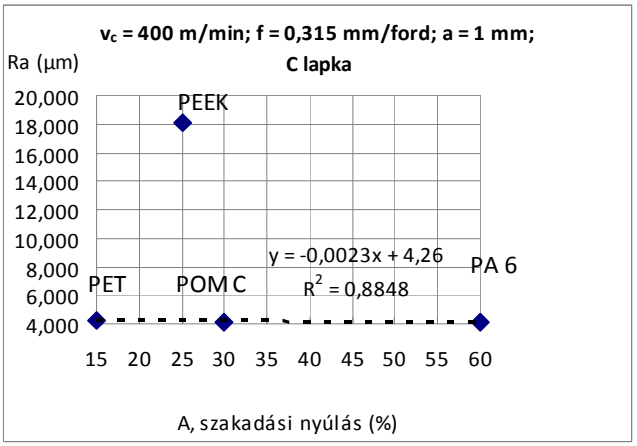




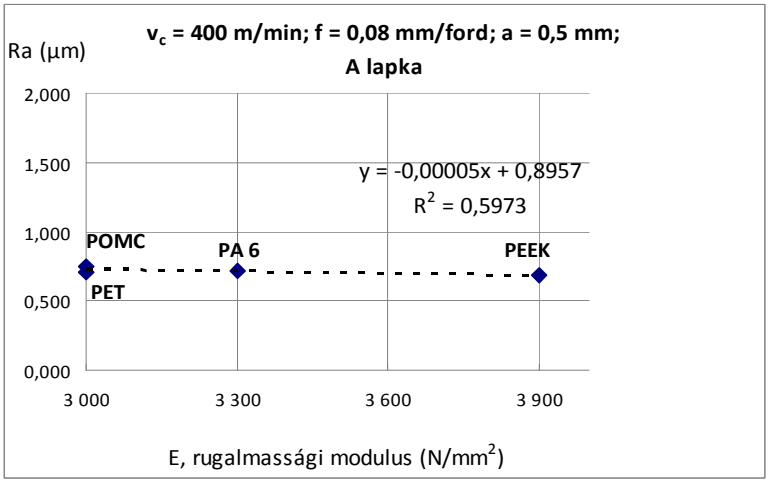
M10.5. ábra. Átlagos érdesség a szakadási nyúlás függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

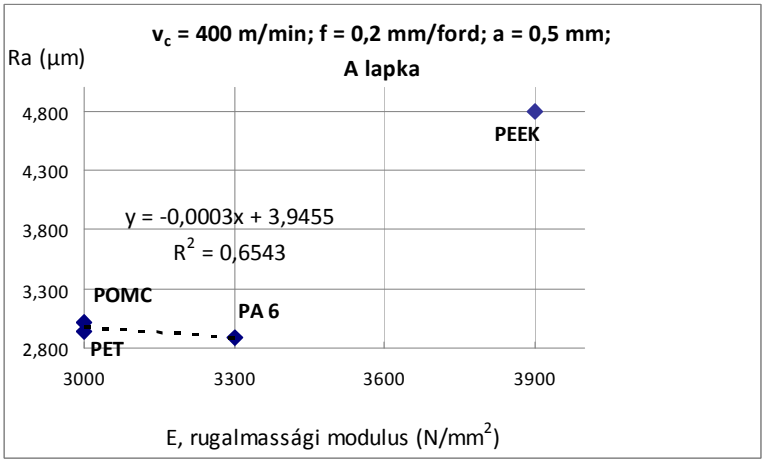


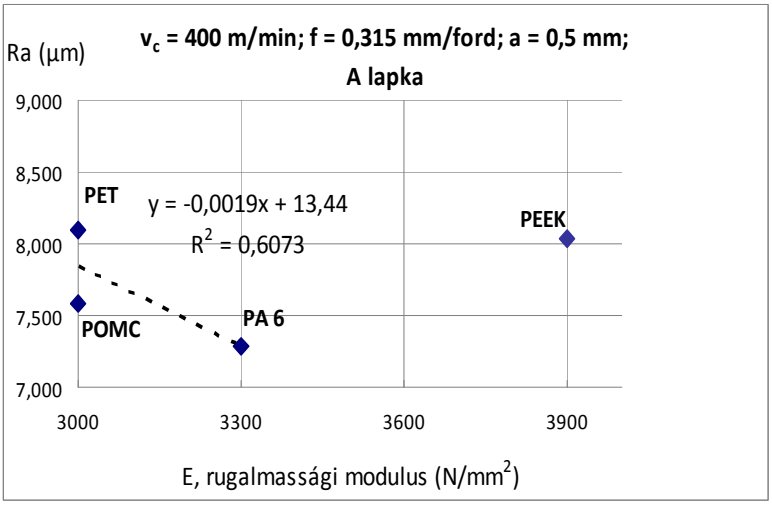




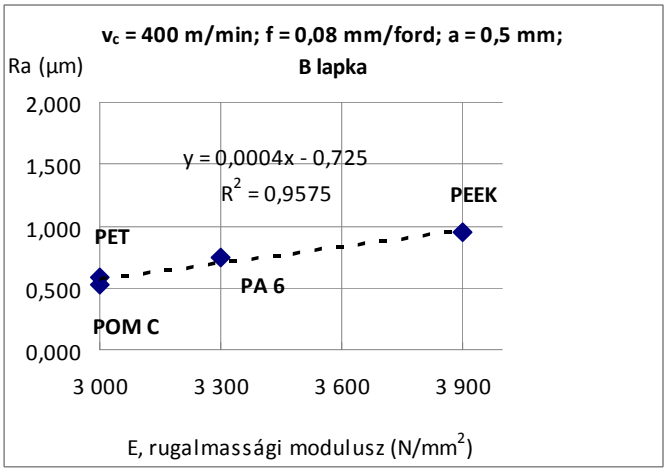
M10.6. ábra. Átlagos érdesség a szakadási nyúlás függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)

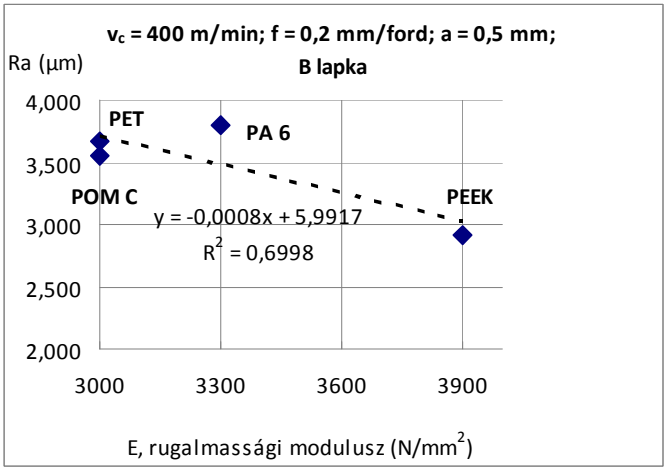


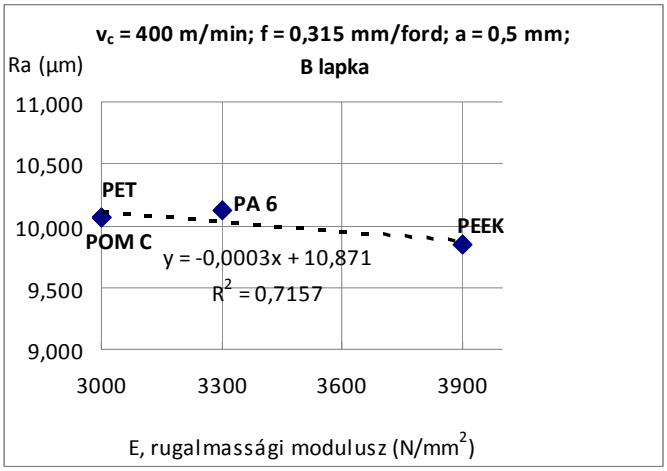




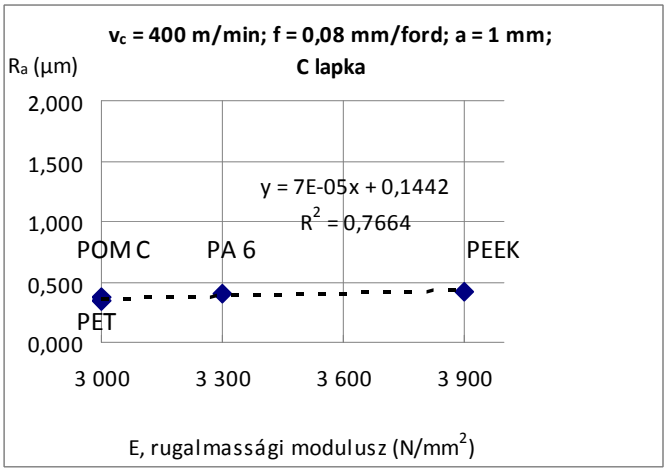
M10.7. ábra. Átlagos érdesség a rugalmassági modulus függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

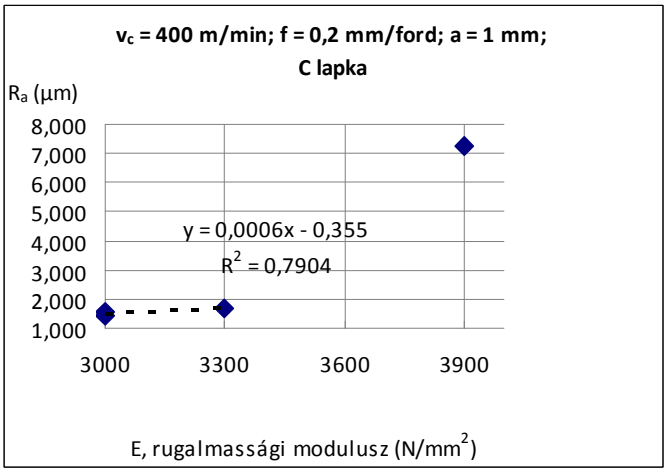


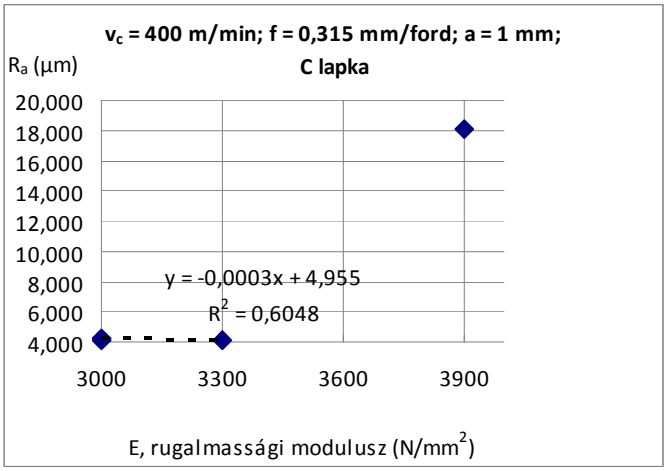




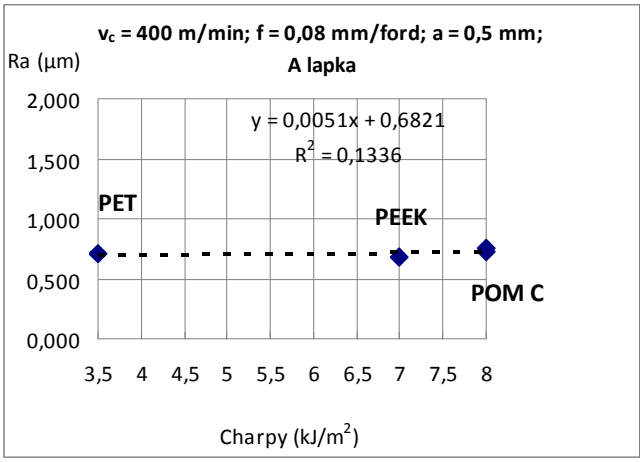
M10.8. ábra. Átlagos érdesség a rugalmassági modulus függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

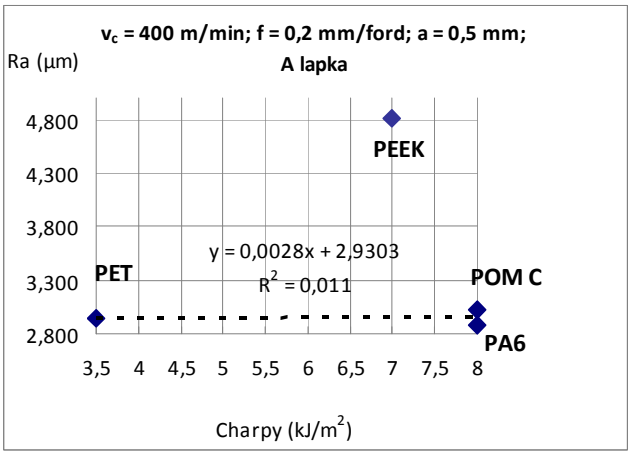


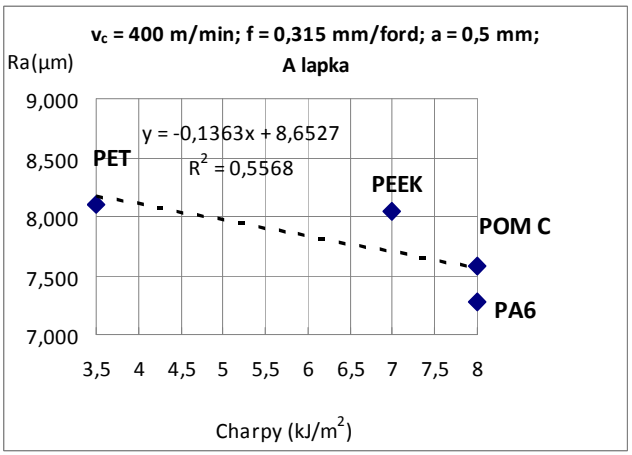




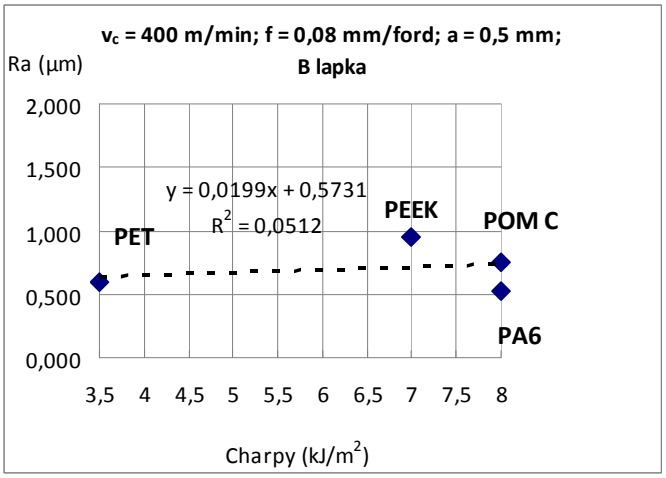
M10.9. ábra. Átlagos érdesség a rugalmassági modulus függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)

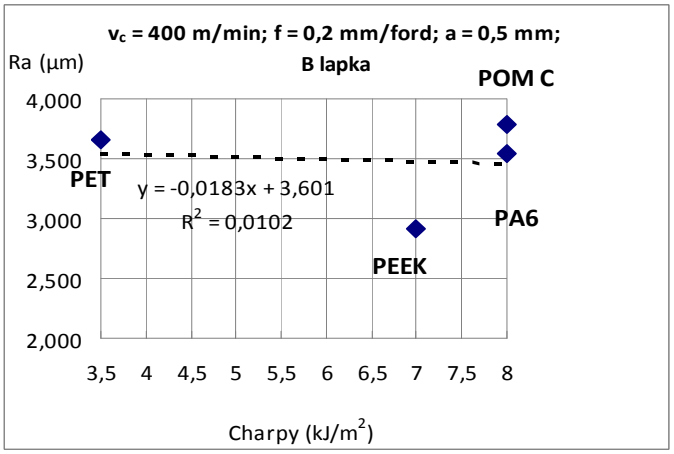


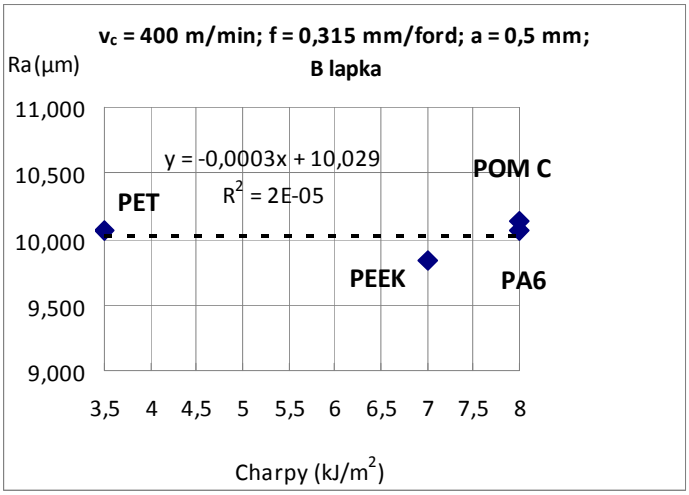




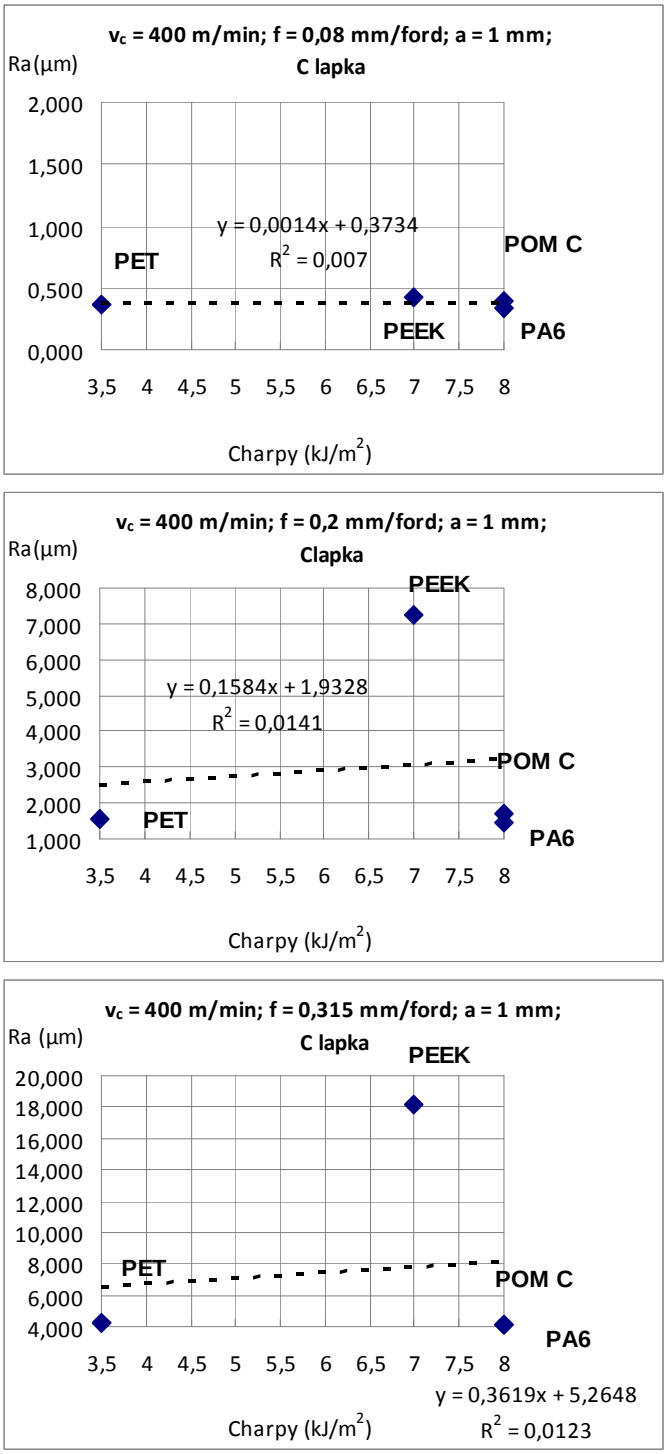
M10.10. ábra. Átlagos érdesség a Charpy fajlagos ütőmunka függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)



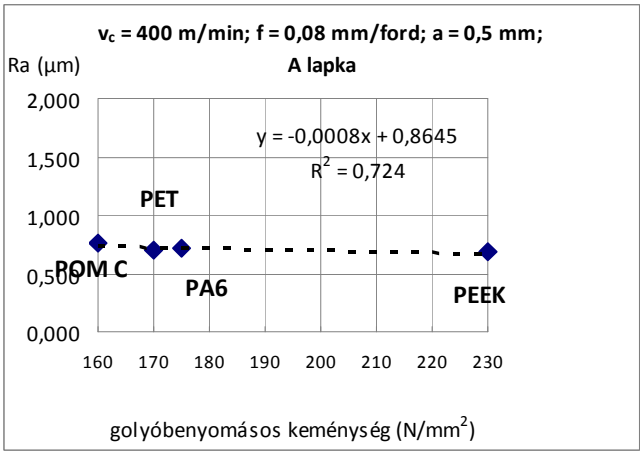


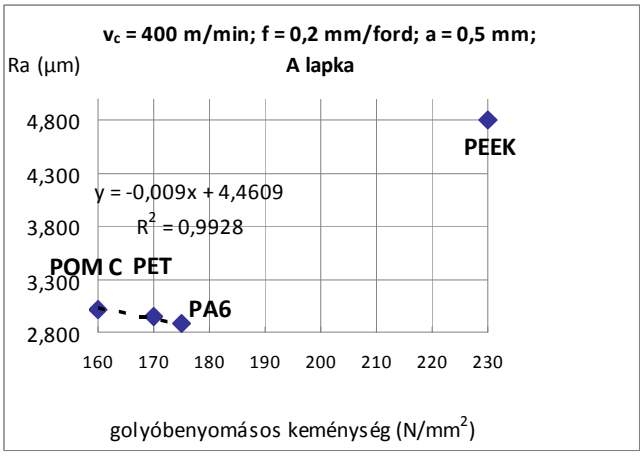


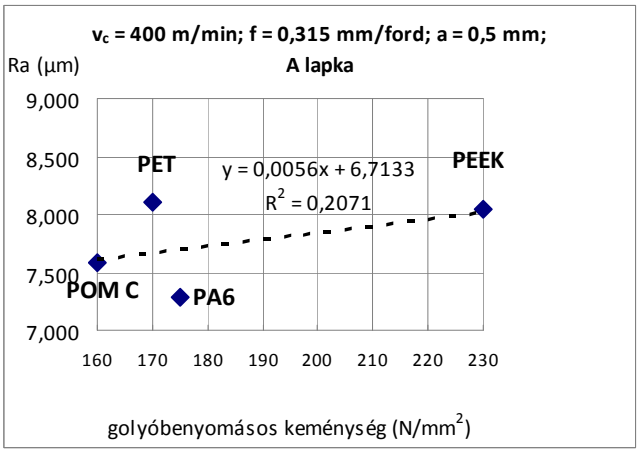
M10.11. ábra. Átlagos érdesség a Charpy fajlagos ütőmunka függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)



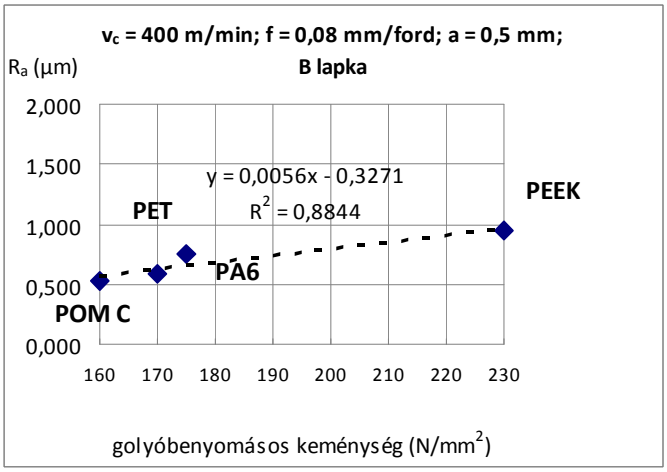
M10.12. ábra. Átlagos érdesség a Charpy fajlagos ütőmunka függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)

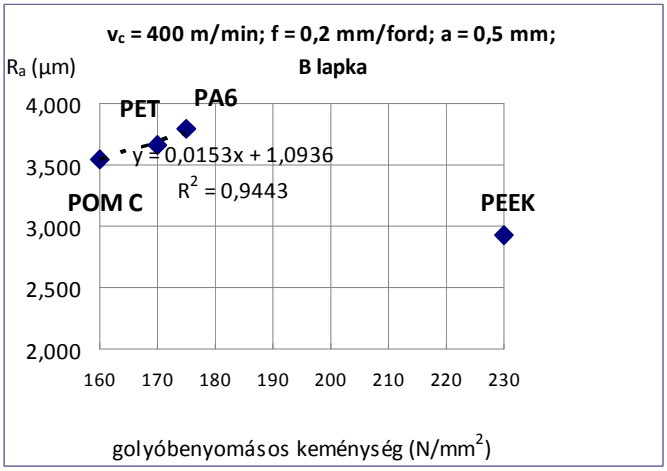


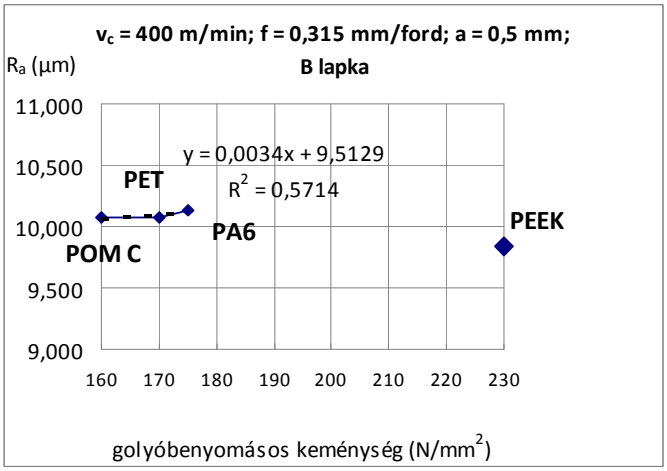




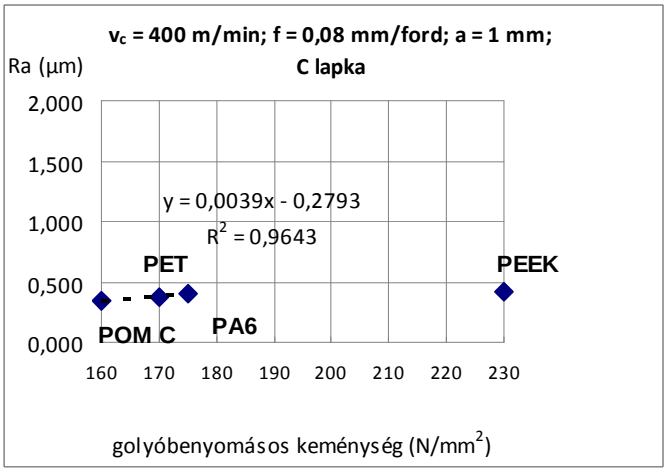
M10.13. ábra. Átlagos érdesség a golyóbenyomásos keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

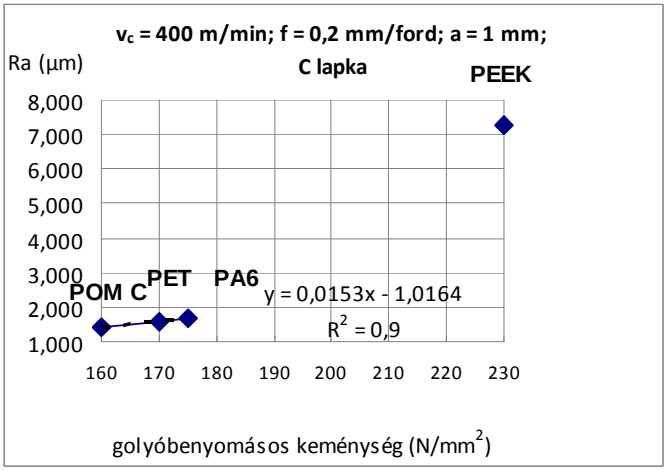


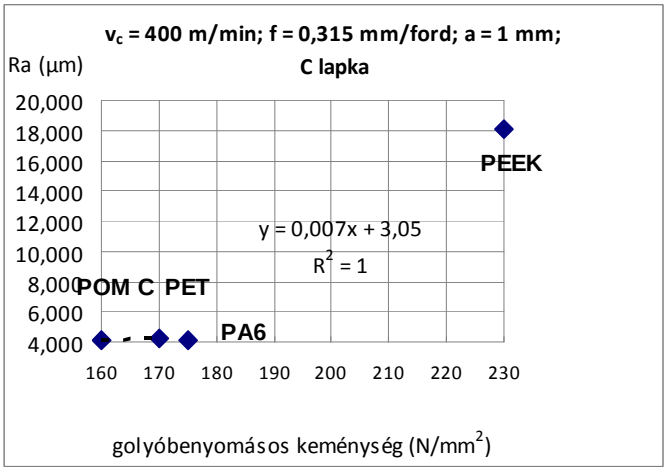




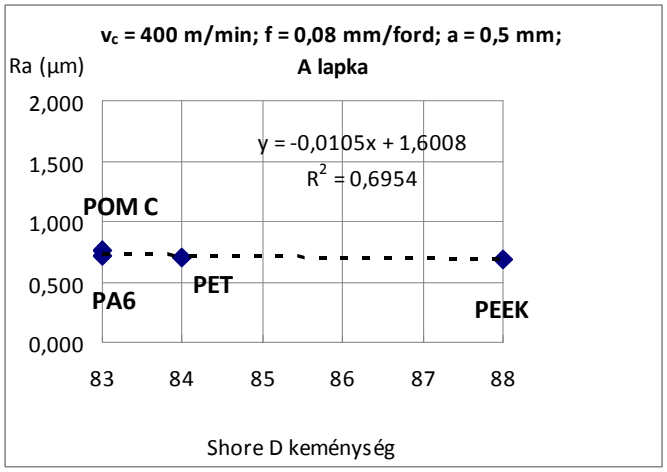
M10.14. ábra. Átlagos érdesség a golyóbenyomásos keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

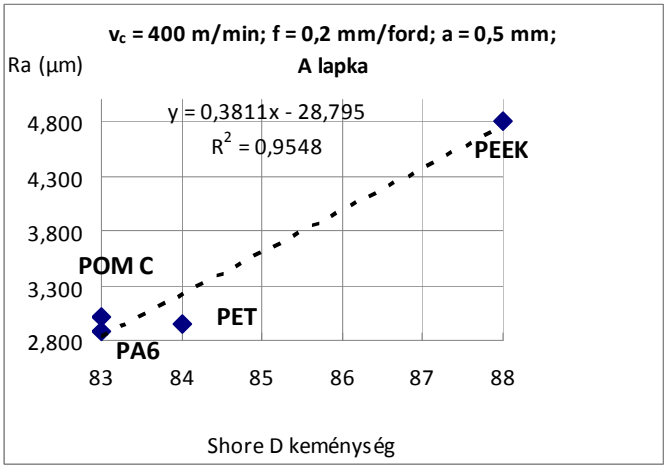


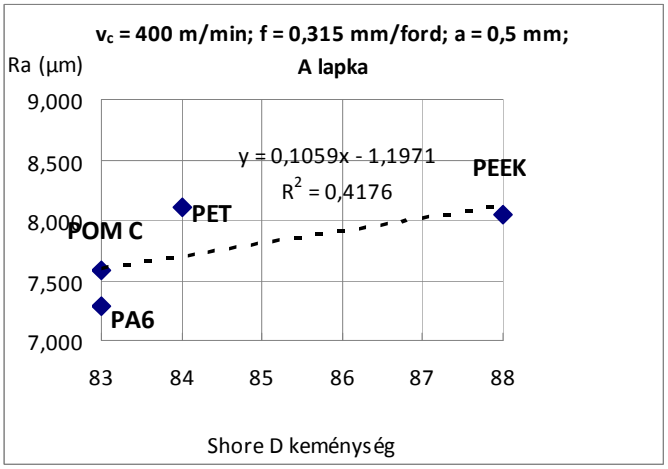




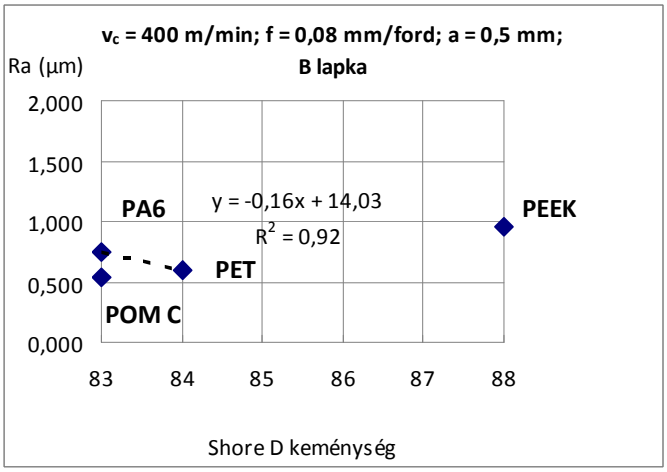
M10.15. ábra. Átlagos érdesség a golyóbenyomásos keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)

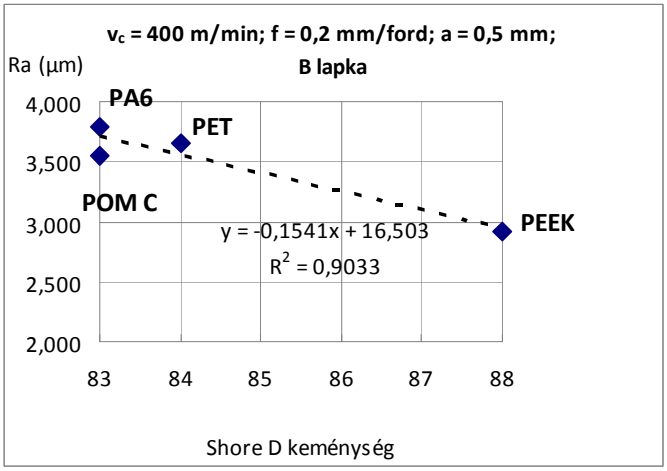


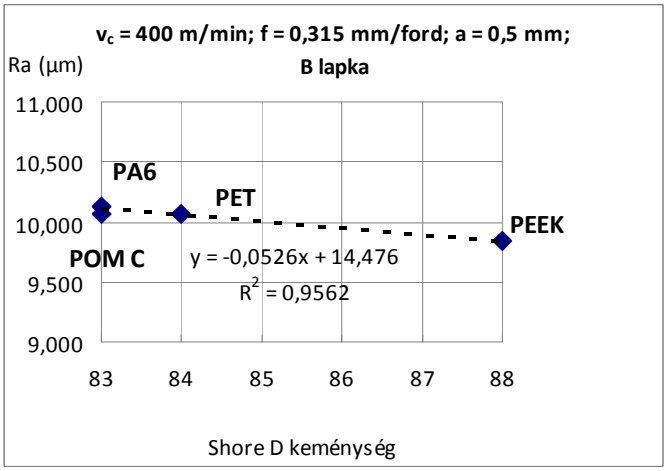




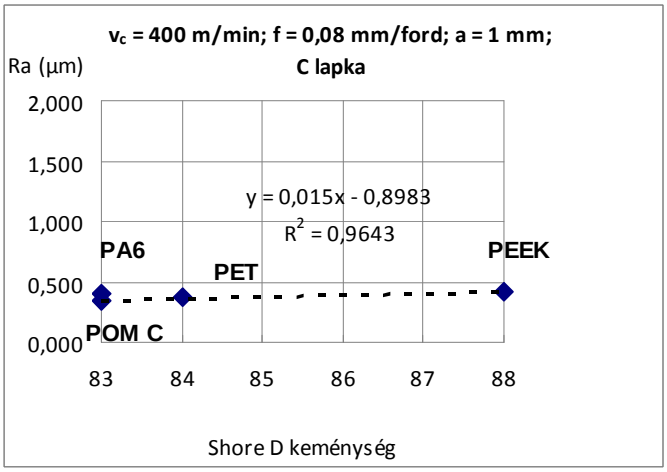
M10.16. ábra. Átlagos érdesség a Shore D keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (A lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)

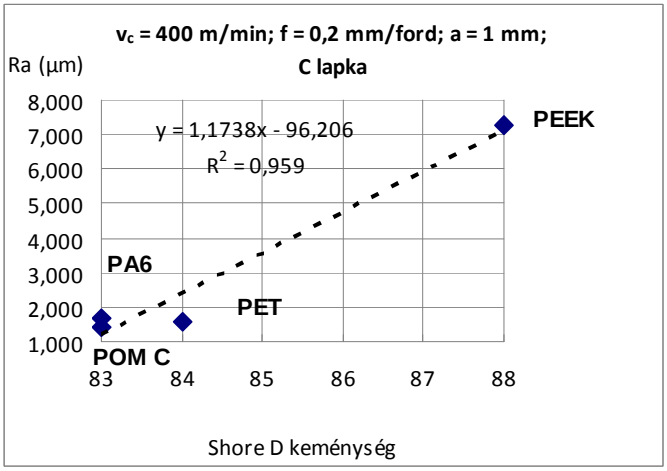


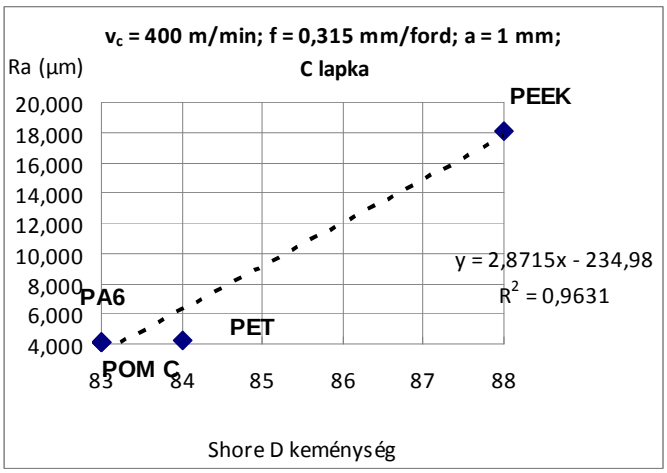




M10.17. ábra. Átlagos érdesség a Shore D keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (B lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 0,5 mm)







M10.18. ábra. Átlagos érdesség a Shore D keménység függvényében PA 6, PET, POM C, PEEK műszaki műanyagok (C lapka; v_c = 400 m/min; f = 0,08; 0,2; 0,315 mm/ford; a = 1 mm)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, dr. Kalácska Gábor egyetemi tanárnak és dr. Palásti Kovács Béla főiskolai tanárnak, a sokéves szakmai támogatásért, fáradságért, a munkámhoz szükséges feltételek megteremtéséért és nem utolsó sorban lelki támaszért, amit dolgozatom elkészítése során nyújtottak.

Külön köszönettel tartozom dr. Sipos Sándor főiskolai docensnek, hogy a forgácsolási kísérletek elvégzésében, valamint a kísérletekhez szükséges szerszámok biztosításában hathatós segítséget és tanácsokat nyújtott.

Ezúton szeretném megköszönni Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézetben dr. Kovács Tündének, hogy a dolgozatban szereplő pásztázó-elektronmikroszkópos felvételek elkészítésében segítséget nyújtott.

Ugyancsak köszönettel tartozom az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézeti kollegáimnak, a műhelyvita bírálóinak, a sok javaslatért és észrevételért, valamint az építő jellegű kritikákért.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni családomnak, hogy végtelen türelemmel segítették ennek a munkának az elkészültét, és mindazoknak a támogatását, akik a dolgozat megszületéséhez kisebb-nagyobb mértékben hozzájárultak.