



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Acél felület mikrotopográfiai változása abrúziós kopás
kezdeti szakaszán

Doktori értekezés

Barányi István

Gödöllő
2017

**A doktori iskola
megnevezése:** Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Gépipari Technológiai Intézet

társtémavezető: Czifra Árpád
egyetemi docens, PhD
ÓE, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar
Gépszerkeztetési és Biztonságtechnikai Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	6
1.1. A kutatómunka jelentősége	6
1.2. A kutatómunka célkitűzései	6
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1. Az érdességmérési technikák fejlődéstörténete	8
2.2. Az érdességmérés feldolgozási és kiértékelési technikája	10
2.3. Az érdesség kiértékelésekor alkalmazott paraméterek	15
2.3.1. Síkbeli paraméterek	15
2.3.2. Térbeli paraméterek	18
2.4. A hullámhossztérbeli kiértékelési technikák	20
2.5. Kopásdiagnosztika	22
2.5.1. A kopásdiagnosztika fejlődéstechnikájának bemutatása	22
2.5.2. A kopási folyamatok csoportosítása	23
2.5.3. Az abrázációs kopás	29
2.6. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	32
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	34
3.1. A csonkoló algoritmus	34
3.2. A ponthalmaz előkészítése a csonkoló algoritmushoz	35
3.3. A csonkolási magasság meghatározása a lépésköz függvényében	36
3.4. A ponthalmaz kiegészítése csonkolási magasságban	39
3.5. A vizsgált érdességi paraméterek kiválasztása, az érdességi paraméterek meghatározása	40
3.6. A koptatóberendezés	43
3.7. Az érdességmérő	44
3.8. A próbadarab, csiszolóvászson és a kísérletterv	45
4. EREDMÉNYEK	49
4.1. Az algoritmus bemenetének meghatározása	49
4.1.1. Az érdességi, hullámossági és elsődleges profil összehasonlítása	49
4.1.2. A profil és a mikrotopográfiai mérési technika összehasonlítása	51
4.2. A csonkoló algoritmussal kapott eredmények	56
4.2.1. A síkkal történő foltozás vizsgálata	56
4.2.2. Abráziosan koptatott mikrotopográfiával történő foltozás vizsgálata	60

4.3. Az abráziós kísérletek eredményei	63
4.3.1. <i>Az érdességmérés kiértékelése Descartes térben</i>	63
4.3.2. <i>Az érdességmérés kiértékelése hullámhossz térben</i>	68
4.4. Új tudományos eredmények	71
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	73
6. ÖSSZEFOGLALÁS	74
7. SUMMARY	75
8. MELLÉKLETEK	76
M1. Irodalomjegyzék	76
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	80
M3. Mikrotopografia hullámtérbe transzformálásához és elemzéséhez használt MatLab leíró fájl	82
M4. Csonkoló algoritmus MATLAB leíró fájl síkkal foltozás esetén	83
M5. Csonkoló algoritmus MATLAB leíró fájl abráziós mikrotopográfia foltozás esetén	86
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	89

JELÖLÉSJEGYZÉK

Jel	megnevezés	megnevezés angolul
A_e [mm ²]	mikrotopográfia területe	Area of the microtopography
$F(q_p)$	függvény (hullámhossz-tartományban)	function in wavelength domain
F_n [N]	normálerő	force in normal direction
$F^*(q_p)$	gerjesztő függvény	excitation function
Δx [μm]	lépésköz x irányban	sample length in x direction
H [μm ⁴]	Hurst kitevő	Hurst extension
HB	keménység	hardness
h [μm]	magasság	height
k [-]	kopási tényező	wear factor
s [μm ⁴]	meredekség	slope
D_f [-]	fraktál dimenzió	fractal dimension
L [mm]	súrlódási úthossz	friction path
l [mm]	mérési hossz	sample length
l_x [mm]	mérési hossz x irányban	sample length in x direction
l_y [mm]	mérési hossz y irányban	sample length in y direction
M [-]	pontok száma y irányban	number of the points in y direction
N [-]	pontok száma x irányban	number of the points in x direction
r [mm]	ablakfüggvény mérete	dimension of the window function
Pa [μm]	profil átlagos érdesség	profile average roughness
P_{ku} [-]	profil lapultsági mérőszám	profile kurtosis parameter
P_{sk} [-]	profil ferdeségi mérőszám	profile skewness parameter
P_q [μm]	profil közepes mértani eltérés	profile root mean square roughness
R_a [μm]	átlagos érdesség	average roughness
R_{ku} [-]	lapultsági mérőszám	kurtosis parameter
R_{mr}	hordozóhossz görbe	bearing area curve
R_p [μm]	csúcsmagasság	highest point of the profile
R_q [μm]	közepes mértani eltérés	root mean square roughness
R_{sk} [-]	ferdeségi mérőszám	skewness parameter
R_t [μm]	teljes profilmélység	peak to valley roughness
R_v [μm]	völgymélység	lowest point of the profile
R_z [μm]	egyenetlenség magasság	10 point height
S_a [μm]	átlagos egyenetlenség	average roughness
S_p [μm]	maximális csúcsmagasság	maximum peak height
S_q [μm]	az eltérések mértani átlaga	root mean square height of the scale limited surface
S_v [μm]	maximális völgy mélység	maximum valley depth
V [mm ³]	térfogat	Volume
$Z(x)$	profil függvény	profile function
$Z(x,y)$	mikrotopográfai függvény	microtopography function
Z_i [μm]	profil pontjának magassága	height of the profile point
Z_{jk} [μm]	mikrotopográfia pontjának magassága	height of the microtopography point

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a választott témakör aktualitását kívánom bemutatni és a dolgozat célkitűzéseit foglalom össze.

1.1. A kutatómunka jelentősége

Gépek, gépegységek méretezésekor fő szempont, hogy – üzemszerű működést feltételezve – az elvárt élettartamig megbízhatóan működjenek. A tradicionális méretezési eljárásokat tekintve elmondhatjuk, hogy az anyagjellemző-terhelés-geometria egymáshoz képesti kapcsolatát határozzuk meg:

- adott anyagjellemzők és terhelés segítségével geometriát (hossz, keresztmetszet),
- adott anyagjellemzők és geometria segítségével a megengedhető terhelést (nyomaték, erő, nyomás, hőmérséklet),
- adott terhelés és geometria segítségével minimális szükséges anyagjellemzőket (feszültség, adott hőmérsékleten a repedés továbbterjedéséhez szükséges munka).

A fentebb említett tervezési folyamatokon kívül a részlettervezéskor a megfelelő élettartam elérésének érdekében a tribológiai folyamatok vizsgálata is szükséges. A két egymáson elmozduló felülepár különböző fizikai, hőtani, kémiai és mechanikai folyamatokat definiál. Peterson és társai (Peterson, Winner, 1980) munkájukban kiemelték, hogy az ipari berendezések részegységei (siklócsapágyak, tengelykapcsolók, vezetékek, fékek) esetében a tribológiai méretezés is szükséges, mivel az egymással érintkező felületek jellemzői és a kenési állapot is befolyásolja a működést.

A kezdeti és tribológiai kísérleteket, valamint azok kopási diagramokba foglalását Lim és szerzőtársai mutatják be (Lim, Ashby, 1987) cikkükben különböző anyagpárok és kenési állapotok figyelembevételével. Munkájuknál megfigyelhető, hogy modellkísérletek segítségével a kopás intenzitását határozzák meg az állandósult kopás szakaszában. Későbbiekben Akagaki és Kato egyéb, a kopási mechanizmust befolyásoló paramétereket is figyelembe vesznek (Akagaki, Kato, 1990) a kísérleteik tervezésekor. Napjaink szakirodalmát tekintve elmondható, hogy a széles spektrumú modellkísérleteken alapuló tribológiai vizsgálatok a napi mérnöki munkához szükséges alapadatokat hivatottak meghatározni. A mérési eredmények alapján meghatározott kopási térképek segítik a mérnököket az anyagválasztásban, viszont a kopás kezdeti szakaszáról (ahol a kopási görbe első deriváltja nem konstans) nem adnak megfelelő mennyiségű információt.

A tribológiai vizsgálatok ilyen szempontú értékeléséhez a hagyományos mérés technika (online elmozdulással a próbatest magasságának megváltozása) nem célravezető eljárás, ugyanis a felületi mikrotopográfia érdességcsúcsainak magassága a megmunkálástól függően akár több mikron nagyságrendű érték is lehet. Az utóbbi tíz év tribológiai vizsgálatai ezért egyre inkább áttevődnek a mikro és nano szintű tribológiai vizsgálatokra valamint a kopás – érdességet is figyelembe vevő – matematikai modellezésére.

1.2. A kutatómunka célkitűzései

Az utóbbi években a műszaki felületek érdességi paramétereinek függvény alapú leírására számos modellt találunk. Az alkatrészek érdességi jellemzői viszont a kopási folyamat kezdeti szakaszában folyamatosan változnak, így módosítják például a valós érintkezési zónát, a hőátadást és a kenőanyag megtartó képességet. A folyamatosan változó érdességi paraméterek valós idejű jellemzéséhez a kutatók vagy szimulációs modelleket dolgoznak ki, vagy pedig szakaszos tribológiai kísérletek segítségével kétdimenziós érdességi paraméterek, vonalmenti

anyagösszetétel vizsgálatok, mikrokeménység értékek és elektronmikroszkópos képek segítségével jellemzik a folyamatot az állandósult kopás szakaszáig.

Az utóbbi 10 évben megfigyelhető, hogy az érdességméréssel és kiértékeléssel foglalkozó kutatók széleskörűen alkalmazzák a háromdimenziós érdességmérést a felületek részletesebb kiértékeléséhez. Ez a rendszer természetesen nem ad olyan széles körű és részletes jellemzést egy kopási formáról, mint a fentebb említett tribológiai vizsgálatok, viszont lehetőséget nyújt arra vonatkozóan, hogy az egyes kopási formák és a mikrotopográfia változását vizsgálni tudjuk.

A fentiek figyelembevételével kutatómunkám céljai az alábbiakban összegezhetők:

1. Egy olyan csonkoló algoritmus fejlesztése, mely abrúziós kopási folyamatnál a csúcszónában található karcokat is figyelembe veszi a kopás kezdeti szakaszán.
2. A profil és a mikrotopográfiai mérés technika összehasonlítása abrúziósan koptatott felületek esetén.
3. A csonkoló algoritmus segítségével a csúcszóna változások leírása érdességi paraméterek segítségével.
3. Koptatási kísérletek végzése a csonkoló algoritmus validálásaként.
4. Olyan érdességi paraméter vagy paraméterek keresése, melyek előre jelzik a kopás kezdeti szakaszának a végét.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmat tekintem át, majd a végén összefoglaló értékelést készítek.

2.1. Az érdességmérési technikák fejlődéstörténete

A kétdimenziós profilometriát, mint méréstechnikai eszközt az 1930-as években fejlesztették ki. Az első műszerek még elektronikai alkatrészeket nem tartalmaztak, így mechanikai elven oldották meg az alkatrészek felületének minősítését: kezdetben a mérési eredmények egy olajfüsttel és dohánnyal barnított lemezre kerültek. Az elektronikai eszközök széleskörű alkalmazása révén a későbbi konstrukciók már analóg elektronikai elemek segítségével dolgozták fel a mért adatokat, így lehetőség nyílt a jelek több szempontú kiértékelésére is. Az első érdességi paraméterek ekkor jelentek meg (az átlagos érdességet határozták meg). Az 1940-es évektől megfigyelhető, hogy az elsősorban Angliában és Németországban gyártott műszerek egyre több paraméter meghatározására és a profil kirajzolására is képesek voltak. Ebben az időben géptípustól függően akár több száz paramétert is meg lehetett határozni, de a szabványosítás hiánya miatt a különböző gépeken végzett mérések egyrészt a paraméterek különbözősége, másrészt az alkalmazott szűrőtechnikai megfontolások miatt nehezen voltak összehasonlíthatóak. Ezt a kezdeti időszakot két technikai fejlődés zárta le: megkezdődött az egyes paraméterek szabványosítása, valamint digitális számítógépeket kezdtek alkalmazni a kiértékeléskor. A szakirodalom által „parameter rash”-nak nevezett időszak végén elkészült az első numerikusdigitalizáló egységgel ellátott berendezés, melyet a későbbiekben több ország is széleskörűen alkalmazott (pl. Szovjetunió, Németország, Japán).

A következő áttörés a méréstechnikában az 1970-es évek elejére tehető, amikor már miniszámítógépek segítségével értékelték ki az egyes méréseket Talysurf 4 érdességmérő segítségével, így lehetőség nyílt a kor szintjéhez képesti gyors adatfeldolgozásra. Az 1970-es évek végére már olyan elterjedt volt az érdességmérés a kutatói gyakorlatban, hogy T. R. Thomas és K. J. Stout összehívott egy alakuló ülést, melyen megszervezték egy konferenciasorozatot érdességmérés témakörben.

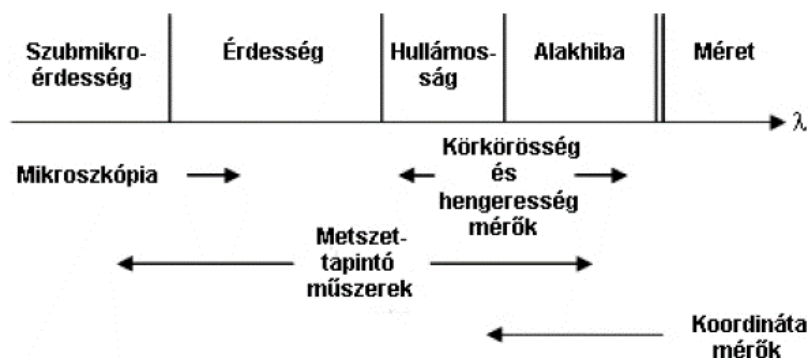
A további évtizedekben különböző elven működő érdességmérési technikákat alkalmazó műszerek jelentek meg a piacon. A jelenleg alkalmazott technikákat foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat A felületvizsgálati technikák csoportosítása (Thomas, 1998)

	Tapintófejes technika	Optikai mérések	Egyéb technikák
Számszerűsítő eredmények	-mechanikus berendezések -elektronikus berendezések	- visszatükröződésen alapuló - teljes integrált szórás - irányeloszlás - direkt Fourier transzformáció - ellipszometria	- mechanikus eljárások - elektronikai eljárások - fluid technikák - akusztikus technikák
Képi megjelenítés	Méret felület képi megjelenítése	- optikai metszetek - optikai tapintók - interferométerek	- vékony metszetek - elektromikroszkópia - pásztázó elektronmikroszkópok

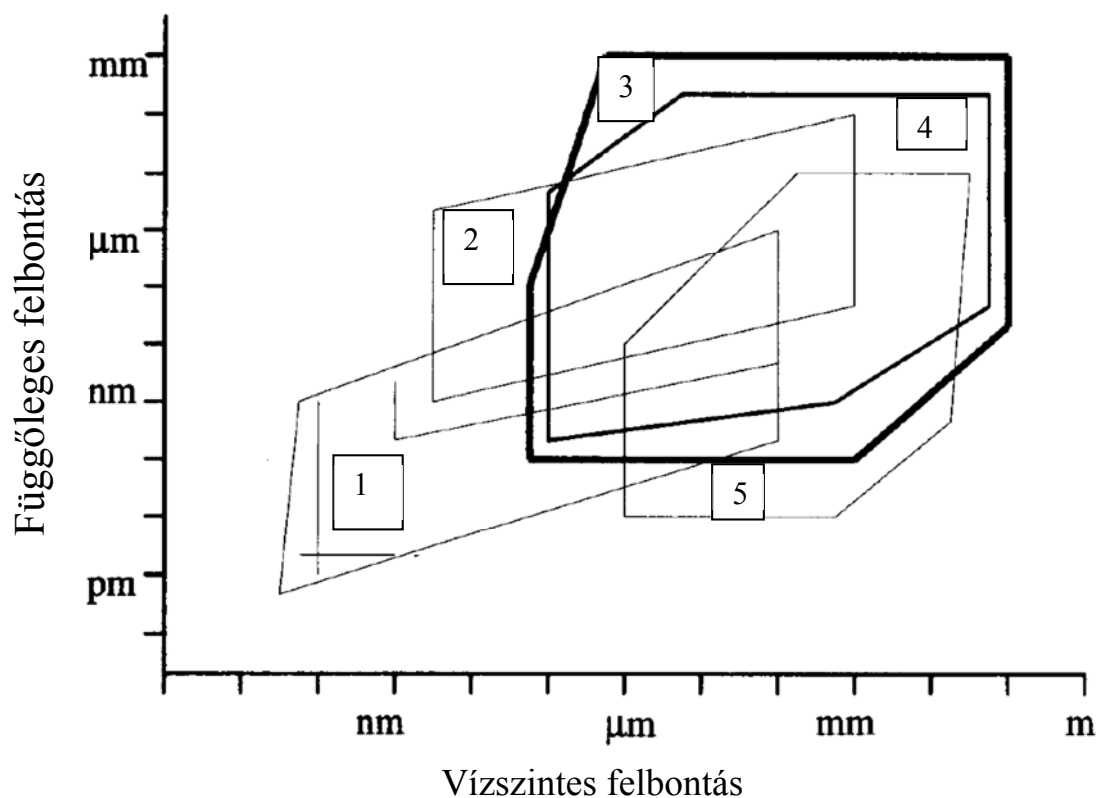
A folyamatos szabványosítási és fejlesztési munka eredményeként a The Properties and Metrology of Engineering Surfaces konferenciákon az 1988-as és a 2004-es évben a mérés technika mellett a kiértékelési technika és az alkalmazástechnika már 75-80%-os arányban jelent meg az előadásokban.

A mérés technika sokszínűsége mellett elmondhatjuk, hogy nem minden felületvizsgálati technika alkalmazható az elméleti felülettől való eltérés meghatározására. Erre a tényre hívja fel a figyelmet Raja és szerzőtársainak munkája (Raja et al., 2002), amelyben javaslatokat ad az egyes technikák alkalmazhatóságára a mérendő jel legkisebb, de még lényeges információt tartalmazó hullámhossza alapján (1. ábra).



1. ábra Raja és társainak ajánlása a felületi vizsgálati technikákhoz (Raja et al., 2002)

Hansen és Roebben (Hansen, Roebben, 2010), valamint Stout és Blunt (Stout, Blunt, 2000) szerint az egyes technikák a vízszintes felbontóképességük mellett a függőleges felbontóképességük alapján is jellemezhetőek.



2. ábra Az amplitúdó-hullámhossz (felbontóképesség) atomerő mikroszkóp (1), pásztázó elektronmikroszkóp (2), tapintófejes (3), optikai metszetes (4) és interferométeres (5) mérés esetén (Stout, Blunt, 2000)

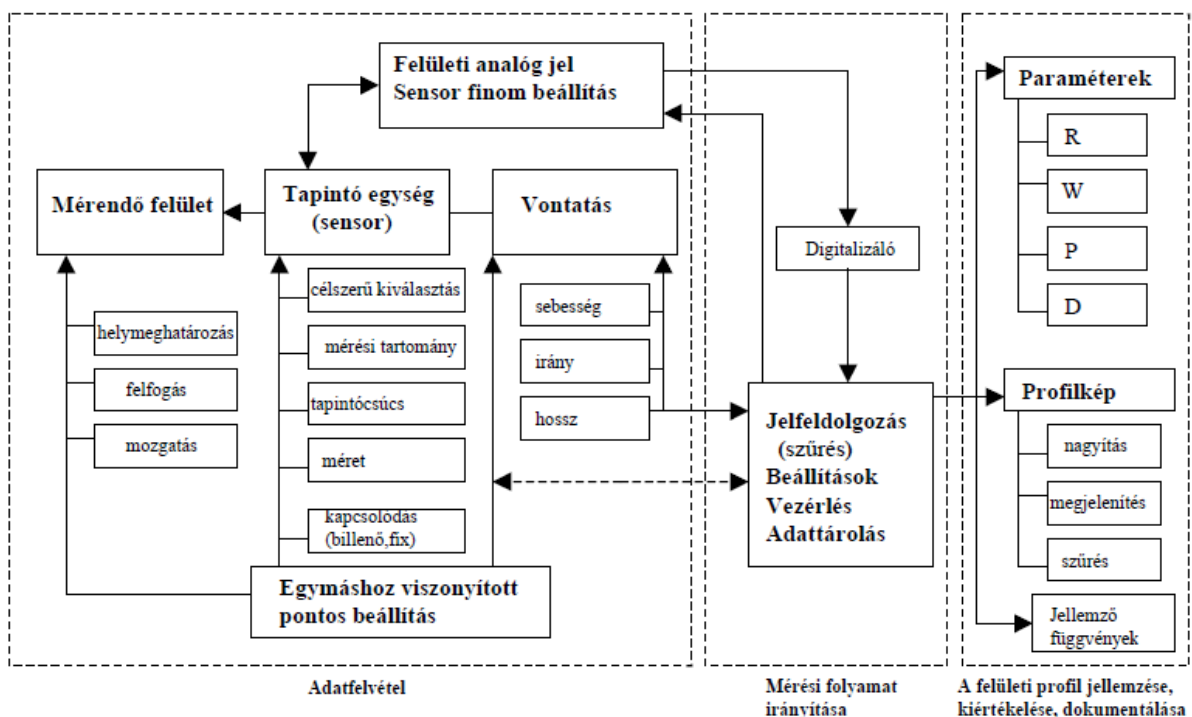
A 2. ábra alapján elmondható, hogy tribológiai vizsgálatokra a legmegfelelőbb az atomerő mikroszkóp lenne a felbontóképessége miatt, viszont a kereskedelemben kapható gépek napjainkban típustól függően általában 0,15 mm x 0,15 mm-es felületet tapogatnak le. Ez a mikrotopográfiák csúcszónájának vizsgálatához bár sok esetben elég, de az érdességi paraméterek meghatározásához általában kevés, mert minimálisan 3-5 domináns hullámhossznyi méretű vontatási hosszra van szükségünk. Ideális esetben a részletes vizsgálathoz atomerő és tapintófejes mérés technika lenne a célravezető.

Az ipari gyakorlat felől közelítve a kérdéskört a tapintófejes és az optikai mérés elvén működő műszerek széleskörű elterjedése figyelhető meg. Mindkét eljárás felbontási képessége napjaink igényeinek megfelel, de a metszettepintós műszerek megbízhatóságuk és érzékenységük miatt sok esetben előnyt élveznek a többi technikával szemben. Gépészeti felületek esetén mérés technikai hibáik (melynek forrásait és csoportosítását a 2.2. fejezetben tárgyalom részletesen) a legtöbb esetben elhanyagolhatóak. Ezért az ipari gyakorlat igényeihez igazodva, ugyanakkor mérlegelve a tudományos igényességet a metszettepintós műszert alkalmasnak tartom a kutatási munkám érdességi méréseinek elvégzésére.

2.2. Az érdességmérés feldolgozási és kiértékelési technikája

A dolgozat keretei nem teszik lehetővé, hogy az összes mérési lehetőséget részletesen ismertessem, így ebben a fejezetben a metszettepintós technika és az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar tulajdonában lévő Mahr metszettepintós műszer kerül bemutatása.

Metszettepintós érdességmérőkor a tú elmozdulását indukciós elven működő elmozdulásmérő alakítja át analóg jellé, majd ez a jel egy A-D átalakítás után kerül a kiértékelő szoftver bemenetére. Egy érdességmérő sematikus blokkvázlatát mutatja be a 3. ábra.



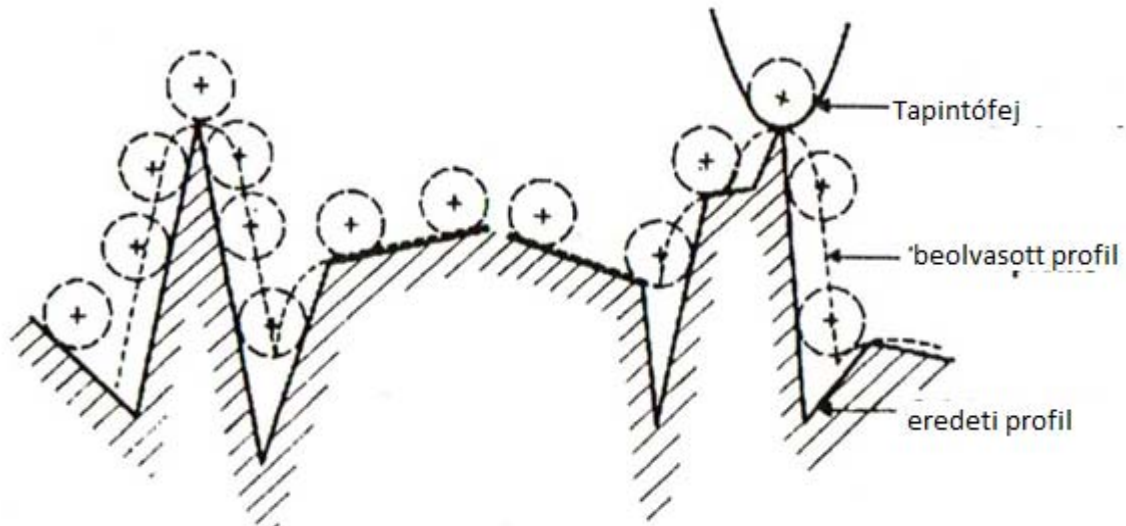
3. ábra Tapintófejjel végzett mérés elve (Palásti és tsai, 2001)

A gyakorlati mérés technikai tapasztalatok alapján elmondhatjuk, hogy a metszettepintós mérési technika – mint minden más mérés technikai eszköz – valamilyen hibával mér. A műszerek fejlesztése során ezeket a hibákat kell minimalizálni.

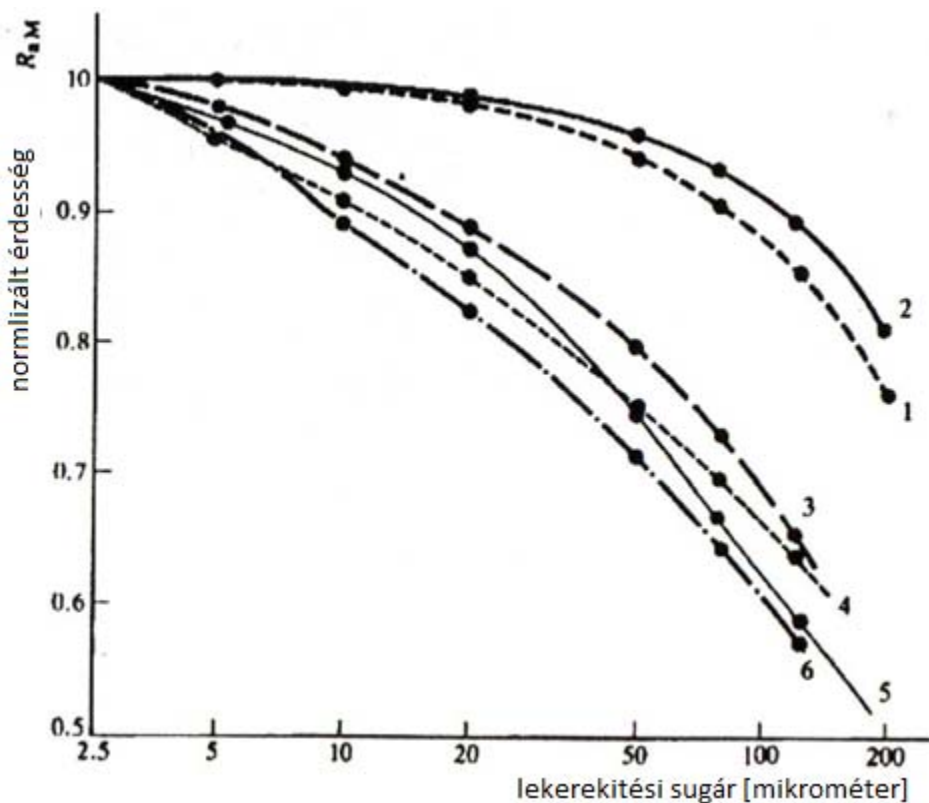
Thomas (Thomas, 1998) könyvében a hibák okait 3 fő csoportra osztja:

- a tapintó mérete okozta hibaforrás,
- a mérőerő által okozott hibaforrás,
- egyéb hibaforrások.

A tapintó tú méretéből származó hibát a 4. és az 5. ábra szemlélteti. A jelenség leírásakor elmondható, hogy a tú lekerekítése adott pontossággal jellemzi csak a profilt.



4. ábra A lekerekítési sugár okozta hiba (Radhakrishnan, 1970)

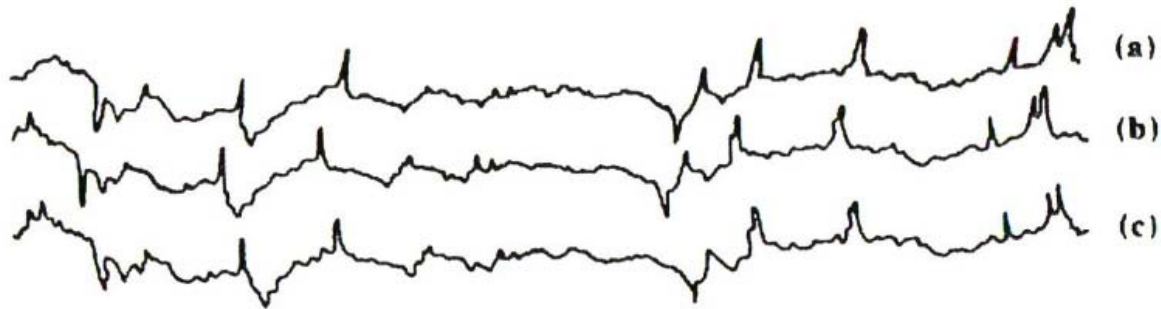


5. ábra A lekerekítési sugár hatása a normalizált általános érdesség paraméterre (Radhakrishnan, 1970): (1) leppelt, (2) elektro eróziós, (3) mart, (4) köszörült, (5) elektrokémiaailag polírozott, (6) hónolt felület esetén (Radhakrishnan, 1970)

A 4. és 5. ábrán látható hibák nagy lekerekítési sugárral rendelkező tapintófejeknél bár számottevően változtatják a mérés eredményét, de Czifra kutatásai során (Czifra, 2007)

megállapította, hogy 5 mikrométeres csúcssugarú tű esetében a 10° -os szögnél a hiba minimális (0,1 mikrométer alatt marad).

A gyakorlatban alkalmazott kis lekerekítési sugarú tű a mérendő felülethez nyomódva nagy felületi nyomást eredményez, mely hatására az anyag lokálisan képlékenyen deformálódhat. Reason és szerzőtársai tudományos jelentésükben 0,06 mN, 0,6 mN és 0,8 mN erővel végeztek profilometriai mérést ugyanazon az alkatrészfelületen és megállapították, hogy a profil a terhelés hatására nem torzult jelentősen (6. ábra).

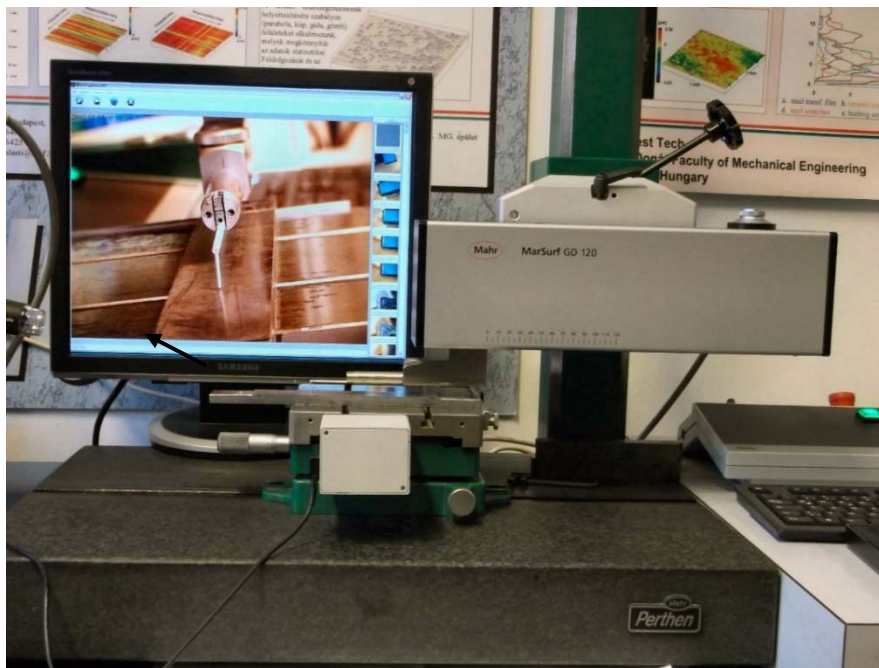


6. ábra Mérési profilok (a) 0,06 mN (b) 0,6 mN és (c) 0,8 mN tapintóerővel végzett ismételt mérések esetén (Reason et al., 1944)

A mérőerő és az egyéb, a gép működéséből adódó hibák kiküszöbölése (a tű megcsúszása a felületen, a mérőerősítő zaja, a vontatási sebesség befolyásoló hatása, az adatgyűjtő dinamikai jellemzői, stb...) a hardver- és szoftverfejlesztők folyamatos munkájának köszönhetően az utóbbi 20 évben már kis szórással ismételhető mérést tesz lehetővé. Természetesen a mérést végző személy képzettsége is fontos a helyes, valóságot jól jellemző mérés elkészítéséhez.

Napjainkban az érdesség mérő műszerek négy részből állnak (7. ábra):

- tapintó tű,
- mozgatóasztal/mozgatóasztalok,
- elektronikus jelfeldolgozó,
- számítógép az adatgyűjtéshez és feldolgozáshoz.



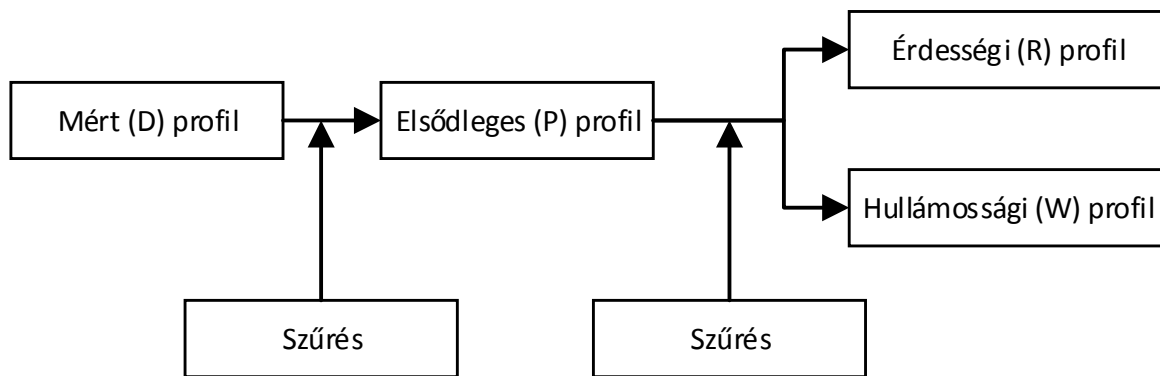
7. ábra Mahr metszettepintós érdességmérő

A tapintó része a gyémánt kúpban végződő tű, melynek geometriája befolyásolja a mérést (méréseimhez 90°-os tűt alkalmaztam 5 mikrométeres lekerekítési sugárral, melynek típusa: MFW-250, azonosító:6851816).

A tű és a mozgató asztalok által definiált rendszer által szolgáltatott analóg jelek egy elektronikus jelfeldolgozó segítségével válnak számítógép által feldolgozható formátumúvá. Ezek után a kiértékelő szoftverek többféle kiértékelési lehetőséget szolgáltatnak:

- M-rendszerű 2D-s érdességi jellemzők meghatározása P , W , R profilok esetében,
- 3D-s érdességi jellemzők meghatározása P , W , R profilok esetében,
- paraméterek kiértékelése ISO, JI, ASME rendszerben,
- kiértékelés MOTIF technikával,
- szoftveresen megvalósított szabványos szűrők a 2D mérés technikához,
- szoftveresen megvalósított ajánlott szűrés technikai megoldások a 3D mérés technikához,
- kisméretű lekerekítések, geometriai eltérések meghatározása,
- stb.

Egy profil mérés adatainak feldolgozását és kiértékelési előkészítését szemlélteti a 8. ábra a hazánkban és nemzetközileg egyaránt legismertebb úgynevezett közép vonalas vagy M-rendszerben.



8. ábra 2D-s érdességmérési adatok adatfeldolgozási blokkvázlata közép vonalas M-rendszerben

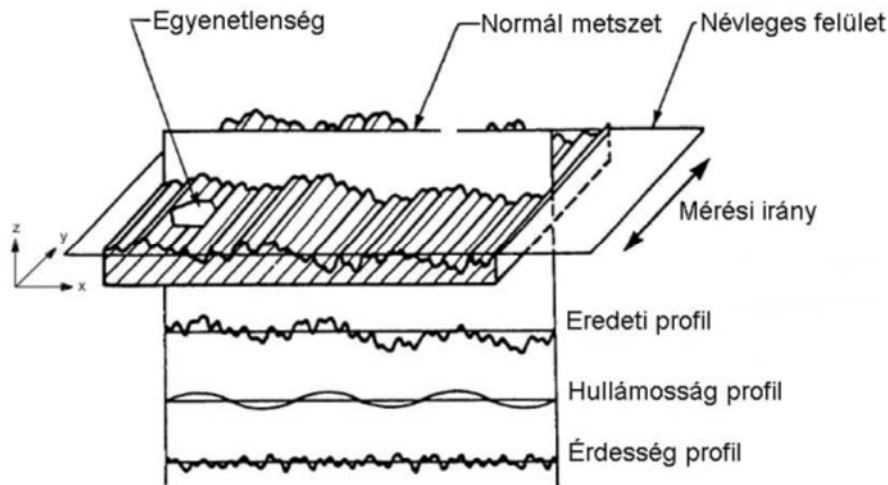
Az adatfeldolgozás felépítése a napjaink szabványi előírása szerint történik, a vonatkozó DIN 4760-as szabvány az elméleti és a valós (mért) felület eltéréseit 6 csoportba sorolja:

1. rendű eltérés: alakhiba (oka: hibás befogás, gép és munkadarab deformáció),
2. rendű eltérés: hullámosság (oka: munkadarab-szerszám-gép-szerszám rendszer rezgése),
3. rendű eltérés: érdesség (oka: szerszám vágóél kialakítás, megmunkálási paraméterek),
4. rendű eltérés: érdesség (oka: anyagrészek kiszakadása a völgy és csúcszónában, felületek képlékeny alakváltozása),
5. rendű eltérés: érdesség (oka: korrózió, felület maródási nyomai),
6. rendű eltérés: szubmikroérdesség.

Kozma könyvében az eltéréseket 4 kategóriába sorolja a az alábbiak szerint (Kozma, 1994):

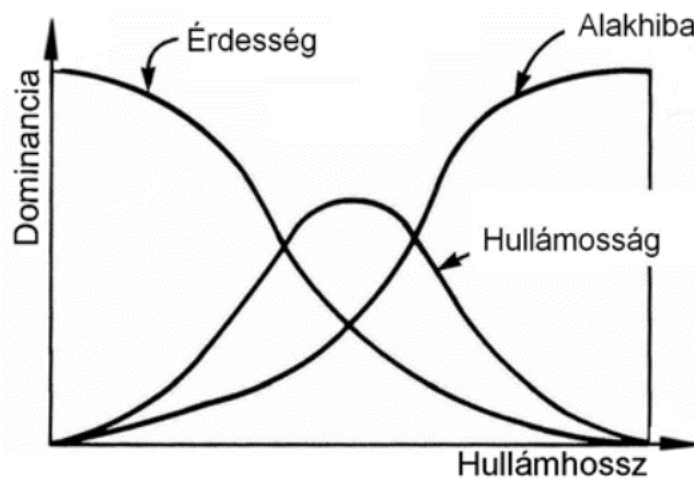
- alakhiba,
- hullámosság,
- érdesség,
- szubmikroérdesség.

Az ASME B46 szabvány a D profilt nem definiálja részletesen, a mérés technikai eszköztár definiálásakor viszont kiemeli a mért, hullámossági és érdességi profil jelentőségét (9. ábra).



9. ábra A hullámossági és érdességi profilok értelmezése (ASME B46.1 Surface texture, 2002)

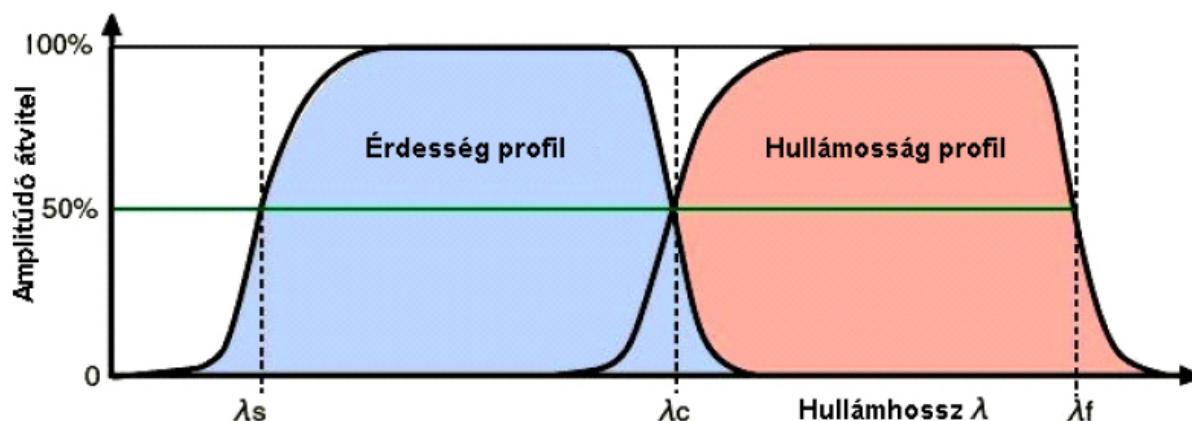
A felületi eltérések pontos definíciójának meghatározásában jelentős volt Whitehouse, Stout és társainak munkássága: munkájukban felhívják arra a figyelmet, hogy az egyes eltérések szétválasztását a hullámhossztérbe történő transzformáció jelenti, de munkájukban érzékeltetik, hogy nem egyértelmű a szétválasztás: az egyes vágási hullámhosszak nem élesen különítik el az alakhiba – hullámosság és hullámosság – érdesség jeleket (10. ábra).



10. ábra A hullámossági és érdességi profilok (Whitehouse, 1994)

Az összetett mérési jelekre vonatkozó szétválasztási problémát a vonatkozó mérés technikai szabványok igyekeznek feloldani. Az ISO 4287:1996-os szabványban a három vágási hullámhosszúság segítségével definiálják a hullámossági és érdességi profilt 50%-os átmeneteli szinten a 11. ábra szerint:

- az első vágási hullámhossz leválasztja a zajokat,
- az első és második vágási hullámhossz között található az érdességet jellemző adatok,
- a második és harmadik vágási hullámhossz között foglalnak helyet a hullámossági jellemzők,
- a harmadik hullámhossztól nagyobb hullámhosszak a leválasztandó rezgéseket jellemzik.



11. ábra A vágási hullámhosszok és az érdességi, hullámossági összetevők elhelyezkedése hullámhossz térben (ISO 4287:1996-os szabvány)

A mérőműszerek kiértékelési és mérési beállításait az ISO 4288-1996 szerint a 10. ábra alapján a 2. táblázat foglalja össze periodikus és nem periodikus profilok esetére.

2. táblázat Mérési beállítások és kiértékelésnél alkalmazott határhullámhosszak

Hullámhossz határok választéka				
Periodikus profil	Nem periodikus profil		Határhullámhossza	Egyes-, teljesmérés szakasz
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

2.3. Az érdesség kiértékelésekor alkalmazott paraméterek

Ebben a pontban a teljesség igénye nélkül a napi mérnöki gyakorlatban alkalmazott legfontosabb paramétereket ismertetem az ASME B46.1 és ISO 4287:1997 szerint.

2.3.1. Síkbeli paraméterek

A vonatkozó szabványok alapján az egyes paraméterek 3 fő osztályba sorolhatók, jelölésük fizikai tartalom szerint:

- a mért paramétereket P (primary) betűvel és a mérőszámot jellemző betűvel (pl. Pa , Pz) jelölik,
- a hullámossági paramétereket W (wave) betűvel és a mérőszámot jellemző betűvel (pl. Wa , Wz) jelölik,
- az érdességi paramétereket R (rough) betűvel és a mérőszámot jellemző betűvel (pl. Ra , Rz) jelölik.

A mért, hullámossági és érdességi paraméterek három alcsoportba sorolhatjuk:

- az egyenetlenségek magasságával kapcsolatos jellemzők,
- az egyenetlenségek profilirányú méreteivel kapcsolatos jellemzők,
- az egyenetlenségek formájával kapcsolatos (ún. hibrid) jellemzők,
- az egyenetlenségek működési jellemzőkkel történő jellemzése.

Továbbiakban az R paraméterek matematikai definiálását ismertettem, hasonló gondolatmenettel a W és P paraméterek definíciója is hasonló alakú.

A gyártási technológiák jellemzésére és a gyártott alkatrészek felületeinek jellemzésére általánosan elfogadott az Ra és az Rz paraméter használata. Az Ra paraméter egy átfogó jellemzést ad az érdességi csúcsok és völgyek méretéről (integrál-középértékével jellemezve).

Az Ra átlagos érdesség értékének meghatározása az alábbi egyenlet szerint történik:

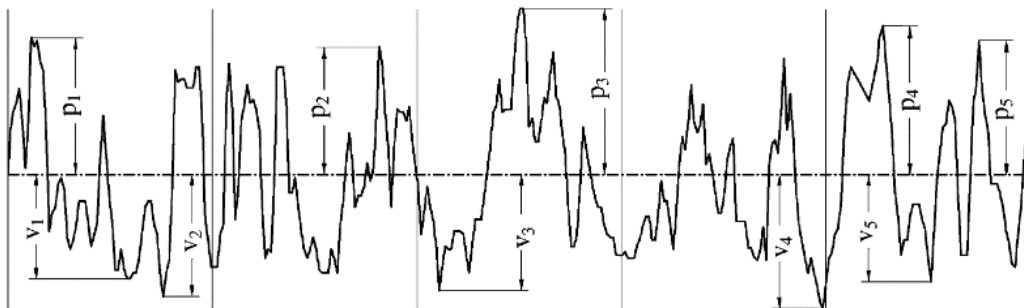
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (1)$$

Az (1) egyenlet segítségével meghatározott paraméter érzékenysége kicsi a profilon belüli lokális hibákra, így a gyakorlatban az Rq (profil közepes mértani eltérése) is elterjedt, melyet a (2) egyenlet definiál:

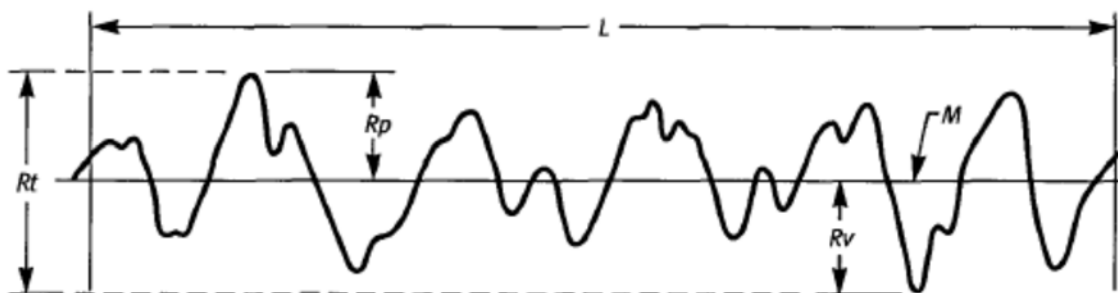
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx}. \quad (2)$$

Az egyenetlenség magasság (Rz) értéke az (Ra) értékével szemben ugrásszerűen megnő a völgyzónában vagy a csúcszónában található lokális hibák hatására. Értékének meghatározásakor a vizsgálati hosszban belül az 5 legmagasabb, valamint az 5 legmélyebb pont távolságát határozzuk meg az 12. ábra és a (3) egyenlet szerint:

$$Rz = \frac{l}{n} \left(\sum_{i=1}^5 p_i - \sum_{i=1}^5 v_i \right). \quad (3)$$



12. ábra Az egyenetlenség magasság Rz értelmezése a mérési hosszban (ASME B46.1 Surface texture, 2002)



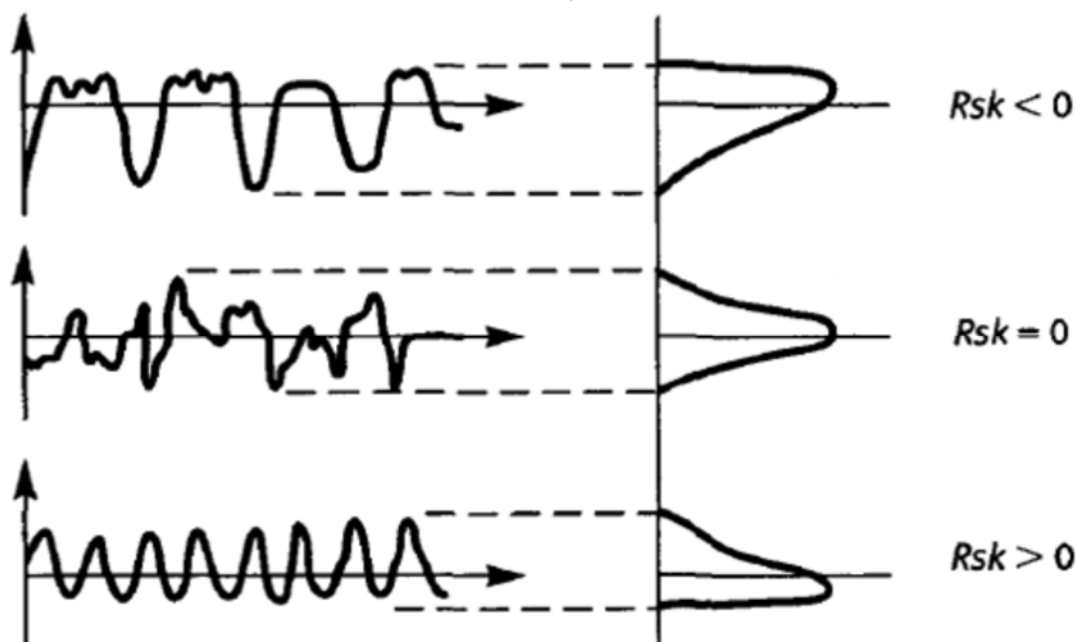
13. ábra A csúcsmagasság, völgymélység és teljes profilmélység értelmezése a vizsgálati hosszban (ASME B46.1 Surface texture, 2002)

Az egyenetlenség magasság paraméter – mely például a köszörülési folyamat egyik jellemző mérőszáma – a profil pontjainak középvonaltól mért távolságát és a lokális hiba helyzetét (csúcsonában vagy a völgyzónában való elhelyezkedését) nem megfelelően írja le, így a szabvány külön paraméterekként foglalkozik a csúcsmagasság (R_p), a völgymélység (R_v), és teljes profilmélység (R_t) paraméterekkel (13. ábra).

A profil pontjainak a középvonaltól való eltérését az előzőekben ismertetett paraméterekkel szemben statisztikailag is lehet jellemezni. A statisztikai jellemzés lehetőséget ad arra vonatkozóan, hogy az adott magasságokban a pontok eloszlási és sűrűségi függvénye által szolgáltatott értékeket használjuk a profil alakját jellemző paraméterként. (Kovács és tsai, 2000) szerint ezek a paraméterek a kopás kezdeti szakaszának jellemzésére alkalmasak.

A ferdeségi mérőszám (R_{sk}) a pontok függőleges eloszlásának jellegét mutatja meg. Értelmezése a mérési hossz (4) szerint:

$$R_{sk} = \frac{1}{Rq^3} \frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^3 dx. \quad (4)$$

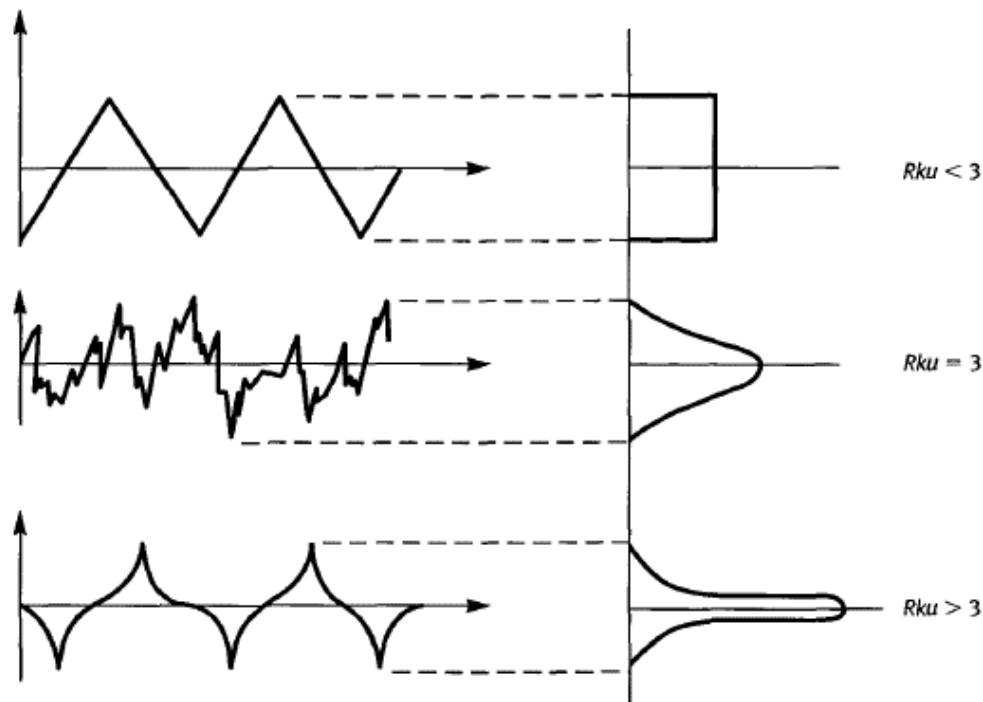


14. ábra A ferdeségi mérőszám különböző profil alakok esetén
(ASME B46.1 Surface texture, 2002)

A (4) egyenlet matematikai alakja és a 14. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a paraméter értékének csökkenése a középvonaltól feletti pontok nagyobb számát jellemzi, azaz a csúcsona negatív értékű ferdeségi mérőszám hatására „zömökebb” képet mutat. Amennyiben a paraméter értéke pozitív, úgy a csúcsonára a vékony, „csúcsos” alak a jellemző.

A pontok függőleges tengely szerinti sűrűségfüggvényének jellemzésére a lapultsági mérőszám használatos, melyet a (5) egyenlet definiál folytonos alakban és a profil alakjától való függését szemlélteti a 15 ábra:

$$R_{ku} = \frac{1}{Rq^4} \frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^4 dx. \quad (5)$$



15. ábra A lapultsági mérőszám különböző profil alakok esetén
(ASME B46.1 Surface texture, 2002)

A lapultsági mérőszám segítségével a középértéktől való eltérést jellemezhetjük: a paraméter érzékenyen reagál a középvonaltól távolra elhelyezkedő értékekre.

2.3.2. Térbeli paraméterek

A háromdimenziós mikrotopográfiai mérések kifejlesztésének lehetőségét a számítástechnika rohamos fejlődése segítette elő. A mérőműszerek szempontjából a megfelelő pontosságú léptetés és pozicionálási holtjáték minimalizálás már profilméréskor is megvalósult, a gépek felépítését tekintve így a tú mozgatása helyett a tárgyasztal kétirányú mozgatását kellett megvalósítani. A kutatói gyakorlatban sokszor felmerül a kérdés, hogy kell-e, illetve érdemes-e mikrotopográfiai méréseket végezni. A műszaki felületeket osztályozását tekintve (orientációval rendelkező és orientációval nem rendelkező felületek) elmondható, hogy például esztergálás esetében elméleti megközelítés alapján a profil mérés megfelelően jellemzi a kialakult mikrotopográfia lakját:

- a szerszám fordulatonkénti előtolása jellemzi a profil periodikusságát,
- a géprezgés egymással párhuzamos síkokban ugyanaz,
- a kés kopása rámásolódik a profilra,
- homogén anyagjellemzőket feltételezve a kitépődések ugyanolyan gyakorisággal történnek.

Gyakorlati szempontból azonban elmondható, hogy a megmunkáláskor definiálható lengő rendszerek, az anyagi inhomogenitás, a gyártáskor kialakuló alaktúrések egy olyan összetett rendszert definiálnak, melynek esetében az előtolásra merőleges irányban felvett profilok nem jellemezhetőek konstans függvényekkel.

Más gyártási eljárásokat vizsgálva (pl. marás, köszörülés, leppelés) esetében a profilméréskor definiált főirányra merőlegesen is a felületet jellemző információtöbbletbe jutunk:

- maráskor a profil két csúcszónájának távolsága (az előtolás értéke) változik a szerszám középvonaltól való távolság függvényében,

- nem orientált mikrotopográfiai esetében a völgyek és a csúcsok alakja, egymáshoz viszonyított helyzete, a lokális hibák nagysága és elhelyezkedése segít a pontosabb felületleírásban.

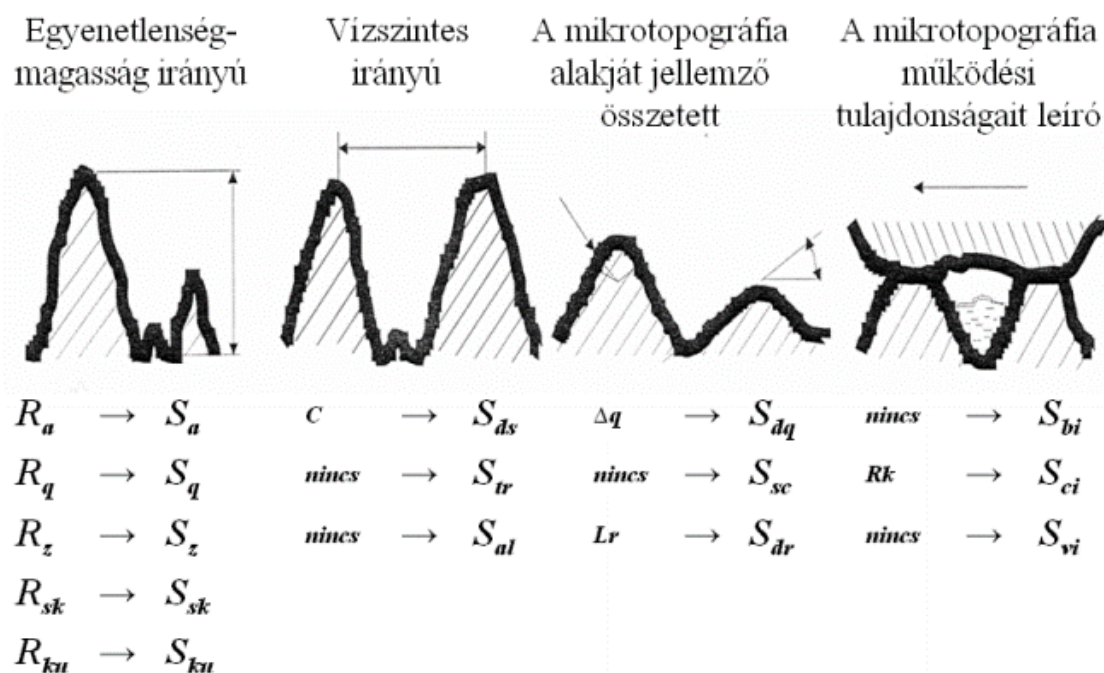
Tribológiai szempontból vizsgálva a kérdéskört, az egymáson elmozduló felületek leírásakor a felületi mikrotopográfia változik: a felületen karcok, pittingek, egyéb kopási nyomok keletkeznek. Profilmérés segítségével ezek a változások csak mérésenként egy irányban írhatóak le korrekten, részletes jellemzéshez egymáshoz képest – véleményem szerint – jól definiált távolságban kell ismételt méréseket végeznünk, azaz mikrotopográfiai mérés elvégzése a célravezetőbb.

A fenti okok miatt az Európai Unió Mérésügyi és Szabványosítási Bizottsága az 1990-es években elkészítette a mikrotopográfia jellemzésére vonatkozó ajánlását. A napjainkban alkalmazott paraméterekről elmondható, hogy matematikai meghatározásuk egyrészt a 2D-s paraméterek kiterjesztésén alapul, másrészt pedig új paraméterek kerültek bevezetésre.

A definiálásra került paraméterek (16. ábra) információtartalmuk alapján négy csoportba sorolhatók (Stout, Blunt, 2000):

- egyenetlenség irányú (amplitúdó jellemzőket vesz figyelembe),
- vízszintes irányú (térközi jellemzőket vesz figyelembe),
- alakot leíró (amplitúdó és térközi jellemzőket vesz figyelembe),
- működési jellemzőket definiáló (funkcionális jellemzőket vesz figyelembe).

Az újonnan bevezetett paraméterek jelölési rendszere is megváltozott, A profilra vonatkozó paramétereket eddigiekben „P” megjelöléssel használták, mikrotopográfia esetében az „S” megjelölés használatos.



16. ábra A mikrotopográfiai paraméterek csoportosítása (Kovács és tsai, 2000)

Az S_a (átlagos egyenetlenség) paraméter meghatározása a (6) szerint történik:

$$S_a = \frac{1}{A_e} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} |Z(x, y)| dx dy = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N |Z_{jk}|. \quad (6)$$

A Sa paraméter (hasonlóan az Ra -hoz) nem jellemzi megfelelően a lokális csúcszóna és völgyzóna hibákat. Az Sq (eltérések mértani átlaga) paraméter matematikai definíciója miatt érzékenyebben változik a lokális hibákra a (7) szerint:

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A_e} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} Z^2(x, y) dx dy} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N Z_{jk}^2}. \quad (7)$$

Hasonlóan az R paramétereknél leírtaknál, a mikrotopográfiai paraméterek között is megjelenik az tízpont magasság (Sz), ahol az 5 legalacsonyabb és az 5 legmagasabb pont jellemzi a felületet, valamint az Sp és Sv paraméter, ami a legnagyobb mikrotopográfia mélységet és magasságot jellemzi.

A statisztikai paraméterek (8) (9) háromdimenziós kiterjesztése a (6) és (7) egyenletek által irányvonalat tükrözi.

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \iint_A Z(x, y)^3 dx dy \quad (8)$$

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \iint_A Z(x, y)^4 dx dy \quad (9)$$

2.4. A hullámhossztérbeli kiértékelési technikák

Az utóbbi évtized mérés-technikai cikkei és kiadványai – kihasználva a matematikai módszereket – komplex analíziseket végeznek a vizsgált profilok esetén. Jelentős előrehaladás tapasztalható a domináns hullámhossz meghatározására vonatkozó technológiák terén. Napjaink népszerű irányzatai közé tartoznak a különböző korrelációs függvények, a teljesítmény sűrűség spektrum (PSD) és a fraktál analízis (Bögel et al., 2016; Czifra és tsai, 2011; Durst et al., 2011; Liu et al., 2015; Vepsäläinen et al., 2013; Wang, Wong, 2000). Ezek a felsorolt módszerek a felületek olyan jellegzetességeit emelik ki, melyet a hagyományos technikák rejtve hagynak, ugyanakkor gyakorlati alkalmazásuk számos nyitott kérdést tartogat.

Műszaki felületek mikrotopográfiájának hullámhossz és fraktál információi számos eljárással határozhatók meg. A helytartományból frekvenciatartományba való áttérés Fourier-transzformációval történik, melynek eredményeit a teljesítmény sűrűség spektrummal (PSD) jellemzik.

A 2D-s PSD függvény előállítható a véletlen jel – esetünkben az érdekességi profil – közvetlen Fourier-transzformáltjával, vagy a jelből származtatott autókorrelációs függvény Fourier-transzformáltjával (Lawrence, Ramamoorthy, 2013; Durst et al., 2011; Boryczko, 2013; Fubel et al., 2007; Xu, Yong, 1993). A kiértékeléskor a gyors Fourier-transzformáció (FFT) a valós térből átvezet a frekvenciatérbe, megjelenítve a jelben található hullámhosszakokat. Az autókorrelációs függvény használatának feltétele, hogy a méréskor a sztochasztikus jeleknek stacionárius és ergodikus jellege legyen. Műszaki felületeink gyártástechnológiája során szinte kivétel nélkül elmondhatjuk, hogy a felület valamilyen periodicitással magán viseli a megmunkálás nyomait, stacionárius jellegű. Az autókorrelációs függvény alkalmazása tehát helyénvaló és megoldást jelent a profilon megjelenő „véletlenszerűnek tűnő” elemek eltávolítására. A belőle származtatott PSD így „letisztult” állapotában jeleníti meg a profil jellegzetes hullámhosszait (Barányi és tsai, 2011).

Egy diszkrét pontokból álló profil Fourier-transzformáltja meghatározható a (10) kifejezéssel:

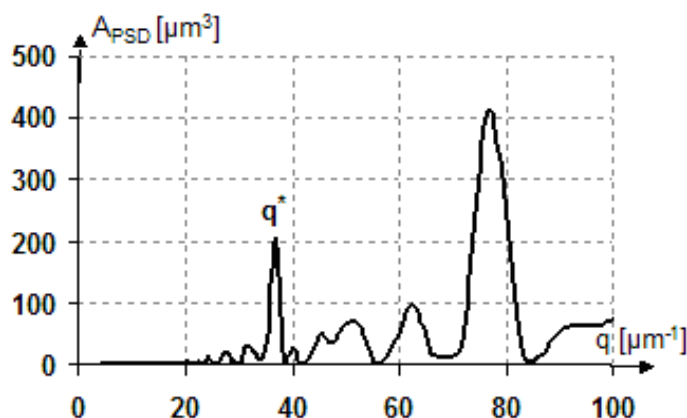
$$F(q_p) = \Delta x \sum_{i=1}^M z(x_i) e^{-j2\pi q_p x_i}. \quad (10)$$

Az így végrehajtott transzformáció eredménye két formában jeleníthető meg a hullámhossz függvényében:

- lineáris léptékben, ahol kiugró lokális maximumként megjelennek a profilra jellemző domináns hullámhosszak (17. ábra),
- logaritmikus léptékben (18. ábra).

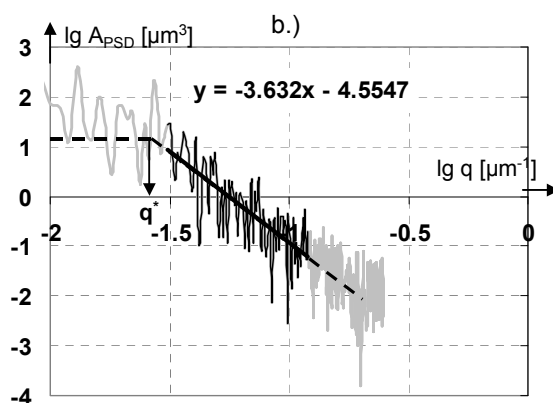
Mindkét megjelenítési stratégia más műszaki tartalmú kiértékelést tesz lehetővé. Lineáris léptékű hullámhossz ábrázolásakor egyrészt a domináns hullámhosszt, másrészt az egyes hullámhossz összetevők amplitúdóját tudjuk megkapni a (11) egyenlet segítségével.

$$A(q_p) = \frac{F(q_p)F^*(q_p)}{M\Delta x} \quad (11)$$



17. ábra Szikraforgácsolt felület egy profiljának PSD görbéje lineáris léptékben (Barányi és tsai, 2011)

Amennyiben a kisebb frekvenciájú összetevőket is meg szeretnénk jeleníteni, úgy a tengelyeket logaritmikus léptékben kell felvennünk.



18. ábra Szikraforgácsolt felület egy profiljának PSD görbéje logaritmikus léptékben (Barányi és tsai, 2011)

Ekkor a jellemző hullámhosszak egy egyenessel közelíthetők, melynek meredeksége a Hurst-kitevő (Sampaio A.L. 2011). A Hurst-kitevőből határozható meg a profil fraktál-dimenziója (13) szerint:

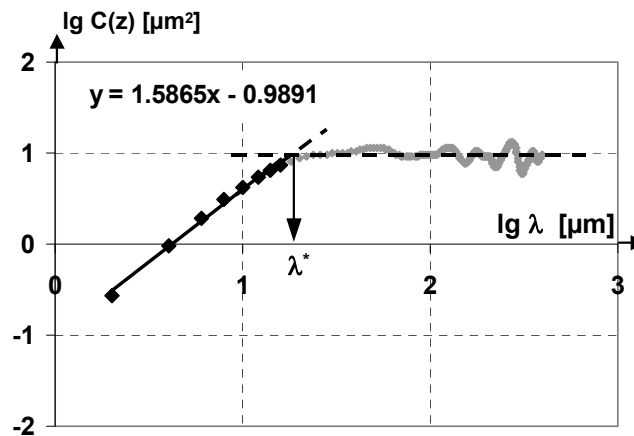
$$H = \frac{-s}{2} - 1 \quad (12)$$

$$D_f = 3 - H \quad (13)$$

A magasság-különbség korreláció ugyancsak a felületnek ezt a jellegét határozza meg más eszközökkel. Le Gal és Klüppel (Le Gal A., M. Klüppel, 2008) által gumi súrlódási modellekben használt magasságkülönbség korrelációs függvény a (14) egyenlet szerint értelmezhető:

$$C_z(\lambda) = \langle ((z(x + \lambda) - z(x))^2) \rangle \quad (14)$$

A magasságkülönbség értékeket a hullámhossz logaritmikus léptékű függvényében alkalmazva olyan görbéhez jutunk, melynek lineáris szakasza a felület fraktál dimenzióját, míg a görbén megjelenő töréspont a domináns hullámhosszt határozza meg a 19. ábra szerint.



19. ábra Szikraforgácsolt felület egy profiljának PSD görbéje logaritmikus léptékben (Barányi és tsai, 2011)

2.5. Kopásdiagnosztika

A kopást szinte minden vele foglalkozó kutató legalább egyszer definiálta, a szakirodalmakban többféle definíciója fellelhető. A kopást a DIN 50320 szabvány szilárd testek szilárd, folyékony, vagy légnemű anyagokkal történő érintkezéskor, relatív elmozdulások által előidézett anyagvesztésként definiálja.

A háromtest elmélet kutatói a kopásnak nevezik azt a folyamatot, ahol a kopott felületek lepusztulásának végeredményeként végleges anyagleválasztás jön létre. Általánosságban elmondható, hogy a kopási folyamat során a vizsgált gépelemeken az alábbi változások figyelhetőek meg:

- nő az illesztési résméret,
- megváltoztatja a felületi érdességet,
- megváltoztatja a gépelem geometriáját.

2.5.1. A kopásdiagnosztika fejlődéstechnikájának bemutatása

Az anyagok kopásával foglalkozó tudomány, a tribológia fejlődéstörténete több ezer éves múltra tekint vissza. Az első egymáson súrlódó gépelem felületek már i.e. 7000 körül jelentek Asszíriában, ahol fából és kőből készült csuklóelemeket tártak fel a régészek. Természetesen ettől a kezdetleges konstrukciótól nagy fejlődésen mentek keresztül nem csak a gépelemek, hanem a tribológia tudományterülete is, míg eljutott a legmodernebb úrsiklóig (Hutchings, 1992).

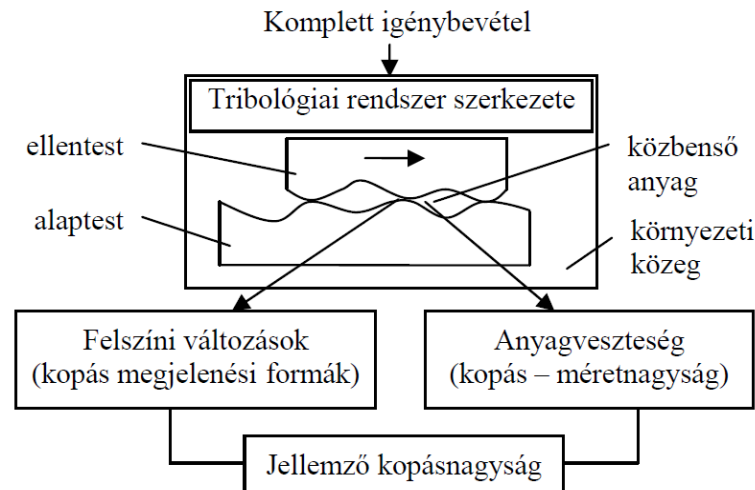
Az utóbbi 30 év szakirodalmát vizsgálva arra a megállapításra jutottam, hogy a kidolgozott elméletek száma jelentősen megnőtt az utóbbi 10 évben. Ez egyrészt azzal magyarázható, hogy a vizsgáloberendezések nagymértékben fejlődtek, lehetőséget teremtve a szélesebb körű

vizsgálatoknak, másrésről a kopási jelenségeket befolyásoló tényezők egyre részletesebb vizsgálata vált szükségessé az összetett folyamatok megértéséhez. A kopási kutatások igen fontos szeletét jelentik a kopási modellek. A tribológiai egyenletek és összefüggések első nem empirikus elemeket tartalmazó eredményeit Bowden és Tabor (Bowden, Tabor 1954) publikálta 1954-ben.

Ugyancsak 1954-ben Kragelszkij (Kragelszkij, 1954) öt jelenséget említ meg a felületek csúszó kopásával kapcsolatban:

- az érdességi csúcsok lenyíródása,
- a csúcs képlékeny deformációja,
- a csúcs rugalmas defomációja,
- a szilárd testen található filmréteg lepusztulása,
- a felületek összeragódása és az azt követő anyag mély kiszakadása.

A súrlódási és a kopási folyamat során ezek a fentebb felsorolt jelenségek összetett hatások végeredményeként jelentkeznek. Ezek a hatások függenek a felületi minőségtől, az anyagi szerkezettől, a kémiai tulajdonságoktól, a kenési állapottól, a mozgásviszonyoktól, terheléstől, sebességtől, a hőtani folyamatoktól, a környezet hőmérsékletétől, szennyezettségétől, stb. (20. ábra).



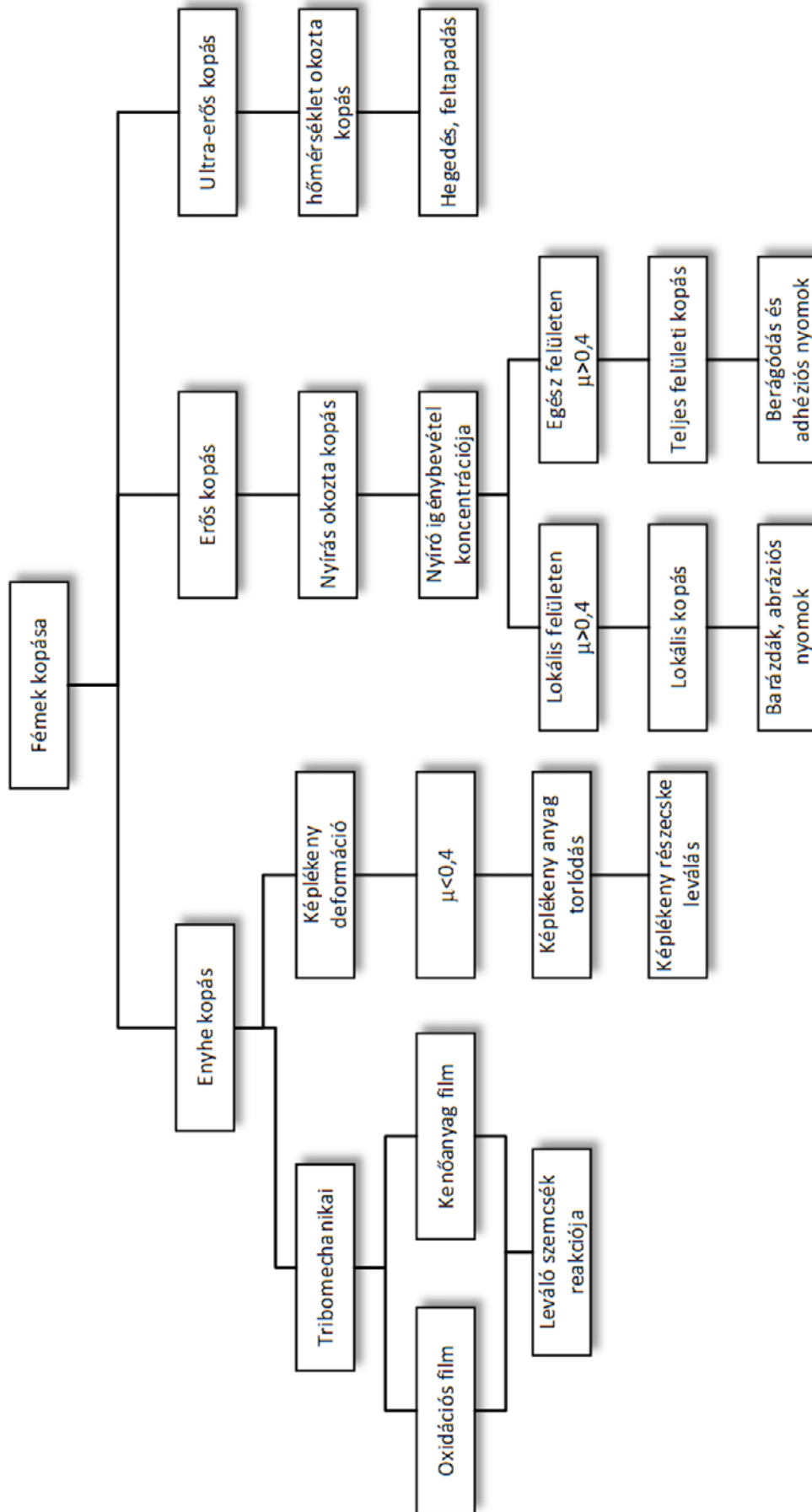
20. ábra Elemi tribológiai rendszer (Valasek, 1996)

2.5.2. A kopási folyamatok csoportosítása

A szakirodalmat vizsgálva elmondható, hogy az egyes kopási formák különböző szempontrendszer szerint csoportosíthatók. A csoportosítás alapja egyrésről a kopást meghatározó tényezők alapján, másrésről a kopási nyomok azonosítása alapján történt.

Vámos Endre (Vámos, 1983) a kopást meghatározó tényezőket 4 fő csoportra osztotta:

- igénybevétel:
 - súrlódás jellege,
 - terhelés,
 - hőhatás.
- súrlódó anyagok:
 - mechanikai tulajdonságok,
 - fizikai tulajdonságok,
 - kémiai tulajdonságok.
- kenőanyag:
 - folyadék,
 - szilárd,
 - gáz.
- abrazívok:
 - méret,
 - keménység.



21. ábra Fémek kopása (Ying, 1996)

Az 1990-es évek második felében hasonló gondolatmenet alapján Ying egy részletesebb csoportosítási lehetőséget ismertetett disszertációjában (Ying, 1996) definiálva az enyhe, erős, és ultra-erős kopás feltételeit és a létrejövő kopási nyomokat. Csoportosítását a 21. ábra szemlélteti.

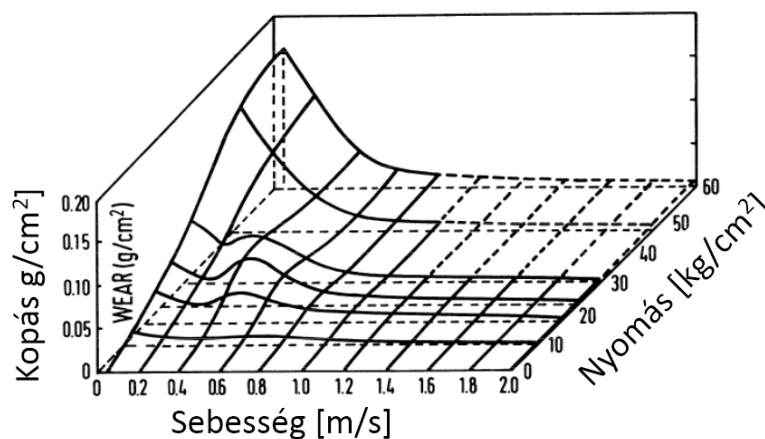
A gépelemek felületén jelentkező kopásokat megjelenésük és a kölcsönhatás szempontjából sok szakirodalom csoportosította, ezek közül a legjobban elterjedt Zum Gahr (Gahr, 1987) és Hutchings csoportosítása (Hutchings, 1992):

- adhéziós kopás (Mishina, Hase, 2013),
- abrázios kopás (Rowe, 2014),
- kifáradásos folyamatokon alapuló kopás (Shen et al., 2015; Jurenka, Španiel, 2014; Jiang et al., 2014; Brandão et al., 2015 ; Dhanapal et al., 2012),
- tribomechanikus kopás (Geringer, Macdonald, 2014, Peng et al., 2015, Taylor et al., 2007, Al-Khalidi, Eyre, 1987; Hird , Field, 2005).

A felsorolt cikkekből látható, hogy a kopási folyamatokat több szempontból is lehet csoportosítani és elemezni, s az eredményeket a karbantartási és termékkorszerűsítési/áttervezési folyamatoknál megfelelően lehet alkalmazni. Az ilyen típusú vizsgálatok – melyek csak a kopási formát definiálják – azonban a tervezéshez nem mindig adnak megfelelő mennyiségű információkat, ezért az 1940-es évektől (mint másik tribológiai kutatási irányvonal) megjelentek a kopási térképek. A kopási térképek elkészítésekor a kopási nyomokon kívül modellkísérletek segítségével a kopási intenzitást is, mint tribológiai jellemzőt meghatározták. Az így megvalósított vizsgálatok során különböző anyagokat tudunk összehasonlítani kopásállóság szempontjából.

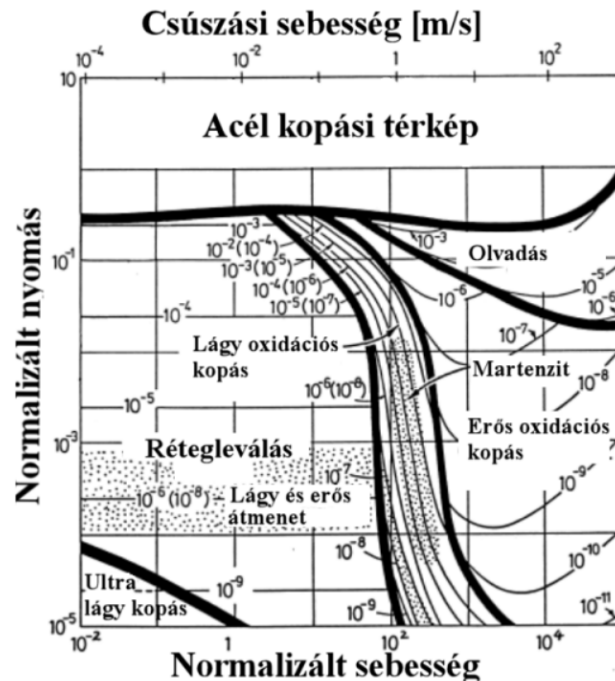
A kopási folyamatok vizsgálata és a kopási intenzitás diagramokba foglalását először Okoshi és Sakai készítette el 1941-ben. A felületeket összeszorító nyomás és a sebesség függvényében vizsgálták a kopási intenzitást g/cm^2 -ben (22. ábra).

A felvett diagramjuk a gyakorlat számára részlegesen, de hasznosítható adatokat szolgáltatott: az adott terhelésű gépelem kopására lehetett előre következtetni a működési sebesség függvényében. Méréseikben a kopási formát nem vették figyelembe, így az így méretezett alkatrész és a meghibásodott alkatrész kopási intenzitása nem volt mindig megegyező, ugyanis a kopási formák megjelenésekor azok intenzitását nem tartalmazta a diagram, mégis a kopásdiagnosztikai publikációk kiinduló adataiként szolgált munkájuk.



22. ábra A szakirodalom első kopási térképe (Okoshi, Sakai, 1941)

A kopási folyamatokat is magába foglaló kopási térképet ugyancsak acél anyagokra S. C. Lim és, M. F. Ashby határozta meg 1987-ben (23. ábra).



23. ábra Az acél anyagok kopási formái a sebesség és a nyomás függvényében (Lim, Ashby, 1987)

Cikkünkkel egy olyan szakirodalmi irányzatot valósítottak meg a kopásdiagnostikában, mely még ma sem múltá idejét. Az újonnan kifejlesztett anyagok esetében a kopási intenzitást és kopási formát elsődlegesen ilyen térképekkel jellemzik (Rao, 2013).

Lim (Lim, Ashby, 1987) cikkében 8 pontban összesítette a kopási térképekkel kapcsolatos elvárásokat a jövőbeni vizsgálatoknál:

- Szükséges olyan kopási térképek kialakítása, ahol az érdességi paraméterek is módosítják a tribológiai rendszert, különös tekintettel a kis sebességen végzett tribológiai vizsgálatokra.
- Olyan kopási térképeket is létre kell hozni, ami a diagnosztikai munkát segíti, mint például a tönkremeneteli térképek és az optimális működési tartomány térképek.
- A kopási térképek információ tartalmát közelíteni kell a végfelhasználók (mérnökök) igényeihez.
- A kopási térképek választékát tovább kell szélesíteni, hogy jobban megértsük a kopás folyamatát.
- A kopási térképek tengelyén olyan értékeket kell feltüntetni, amit a gyakorlatban könnyű meghatározni: a felületi nyomás és a sebesség adatokon kívül a tervezői munkát nagyban elősegítené az egyes anyagjellemzők (pl. keménység) beépítése a térképekbe.
- Fontosnak véli, hogy a továbbiakban olyan térképek szülessenek, melyeknél kis kopási intenzitás van megfelelő kenési állapot mellett, a valós műszaki folyamatokhoz hasonlóan.
- Súrlódási térképek is fontosak lehetnek a gyakorlati életben. Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy amikor a súrlódás megnő, akkor azt a felületi jellemzők helyett a csúszási paraméterek okozzák. Ez a jelenség a kisebb sebesség értékeknél lehet fontosabb.

- A kopási formák megértéséhez gyűjtött adatokat úgy tudjuk megfelelően értékelni, hogyha több kutató csoport ugyanolyan eszközökkel és beállításokkal dolgozik. Az így felállított matematikai modellek összehasonlítása segítséget nyújt a kopás melletti egyéb folyamatok feltérképezéséhez is.

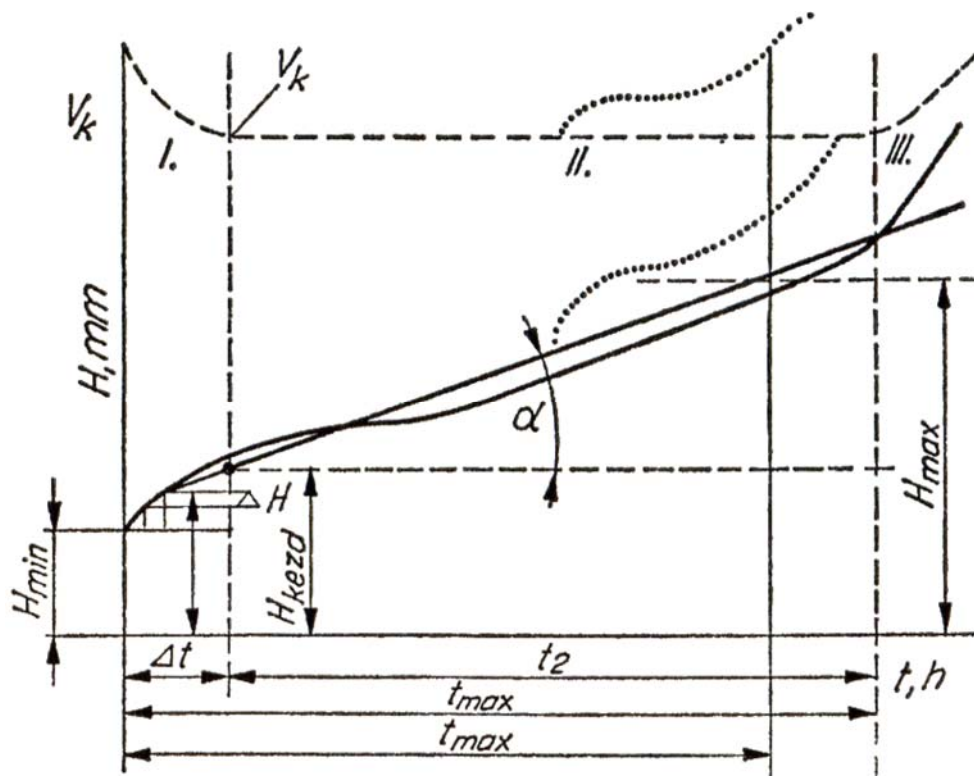
Lim elvárásai a jövőbeni kutatásokkal kapcsolatban csak részlegesen valósultak meg a mai napig. A kitűzött célok megvalósítását nehezíti, hogy a kutatói gyakorlat az esetek nagy részében modellkísérleteket vizsgál, sok esetben elhanyagolva a bejáratási szakaszban bekövetkező változásokat. A valós alkatrész életút vizsgálatára természetesen sokszor nincs elegendő idő (ismételt méréseket feltételezve), illetve a teljeskörű vizsgálat (anyagelemzés, elektromikroszkópos képek készítése, kopási intenzitás meghatározása, érdességmérés) miatt folyamatos vizsgálati rendszerrel a kérdés nem megvalósítható.

Üzemi működést feltételezve egy alkatrész a teljes életútja három fő szakaszra bontható:

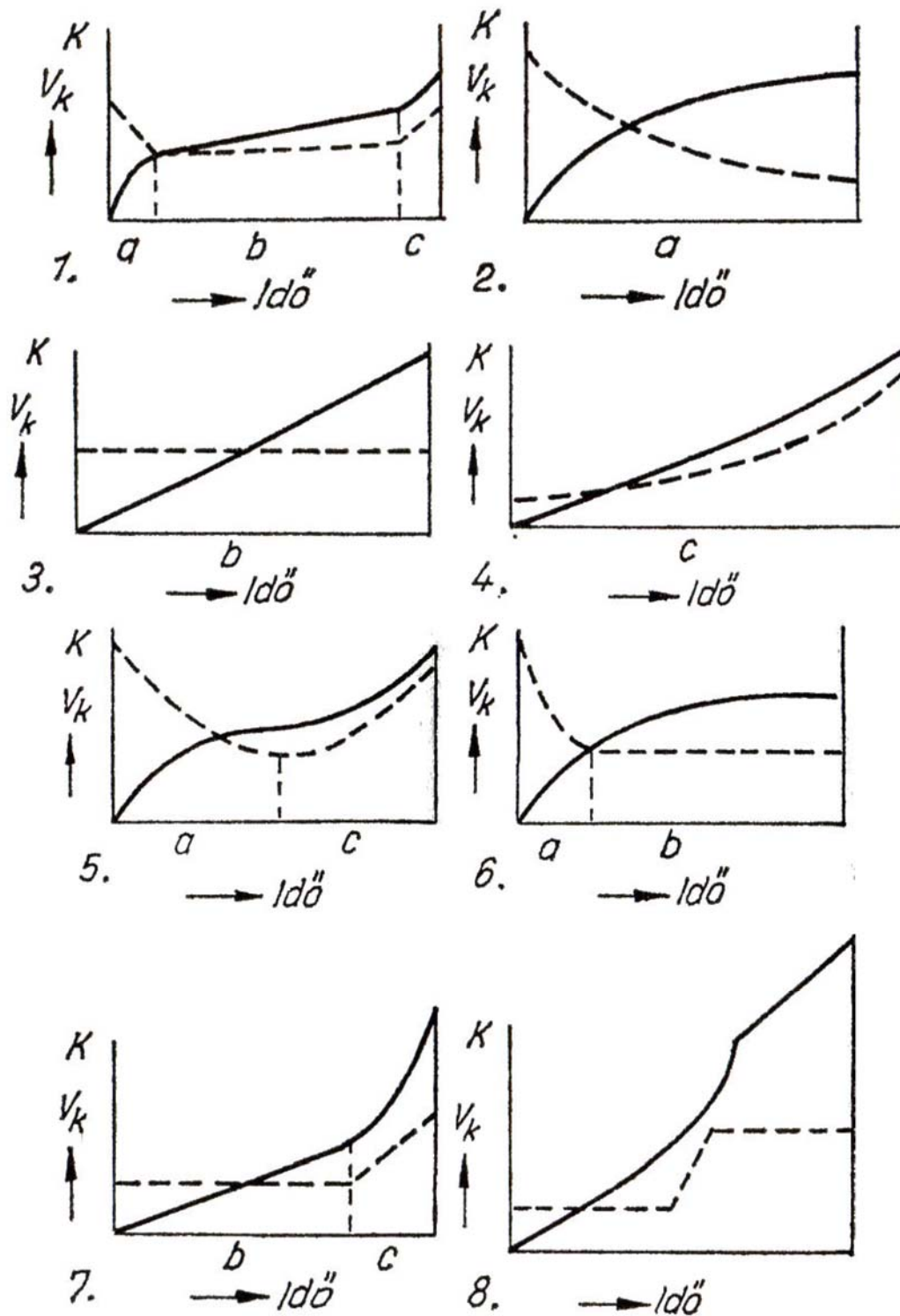
- bejáratási szakasz (24. ábra I. szakasza),
- egyenes kopás szakasza (24. ábra II. szakasza),
- túlkopás (24. ábra III. szakasza).

Az elméleti kopásgörbe Vámos művében (Vámos, 1983) 3 részre tagolódik siklócsapágyak esetén (24. ábra):

- Az első szakaszban a gyártás és szerelés által definiált H hézagméret gyorsan nő, míg a V_k kopási sebesség drasztikusan csökken. A folyamat addig tart, míg az igénybevételeknek megfelelő keménység, felületi állapot, hézagméret, stb. ki nem alakul.
- A második szakaszban a H hézagméret tovább nő, változása az üzemidő függvényében állandó. A görbe első deriváltja (a kopási sebesség) ebben a szakaszban állandó.
- A harmadik szakasz kezdetekor a H hézagméret egy olyan kritikus értéket ér el, ahol már a terhelés egyenetlenül oszlik meg, nő a dinamikus terhelés, így a kopási sebesség nő, a harmadik szakaszban a gépegység üzembiztonsága folyamatosan csökken.



24. ábra Elméleti kopásgörbe (Vámos, 1983)



25. ábra Különböző kopásgörbék (jelölések: a: bekopási szakasz, b: hasznos üzemidő, c: instabilis üzem, folyamos vonal: kopás, szaggatott vonal: kopási sebesség, 1: kopási sebesség kezdetben csökken majd állandó, végül nő, 2: kopási sebesség szigorú monoton csökken, 3: kopási sebesség állandó, 4: kopási sebesség szigorú monoton nő, 5: nincs állandó kopási sebesség érték, 6: nincs kopás, a sebesség felgyorsul, 7: nincs bejáratási szakasz, 8: kopási sebesség hirtelen változik. (Vámos, 1983)

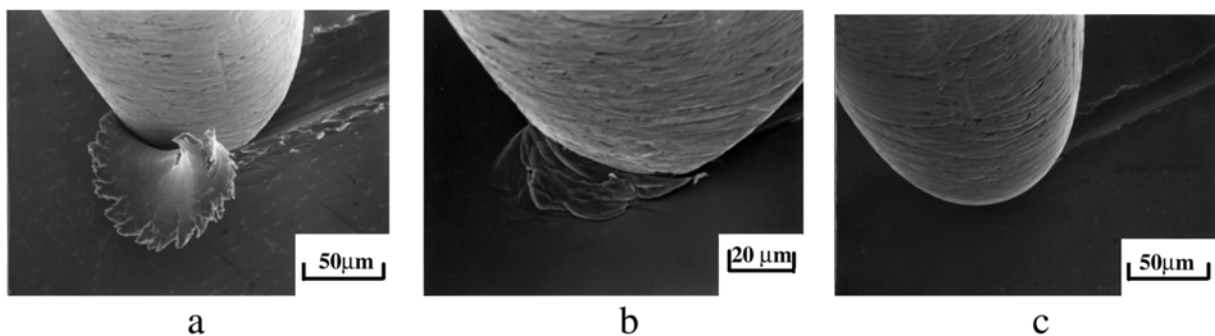
Vámos (Vámos, 1983) művében felhívja a figyelmet arra vonatkozóan, hogy a gyakorlati mérések más alakú kopási görbéket is adhatnak eredményül (25. ábra).

A 24. ábra, valamint a 25. ábra 1,2,5,6,8 esetében elmondható, hogy a tribológiai rendszer vizsgálatához hozzá tartozik a kopás kezdeti szakasza is. A további esetekben a bekopási szakasz eltűnése feltehetőleg két indokra vezethető vissza: vagy nagy túlterheléssel végezték a kísérletet (a bekopási idő közelített a 0-hoz), vagy pedig a megmunkálási nyomok érdekességének alakja közel azonos volt az kísérletek során keletkező kopási nyomokkal.

A következő részekben a tribológiai folyamatok közül az abrázios kopásra jellemző tulajdonságok kerülnek részletesen ismertetésre.

2.5.3. Az abrázios kopás

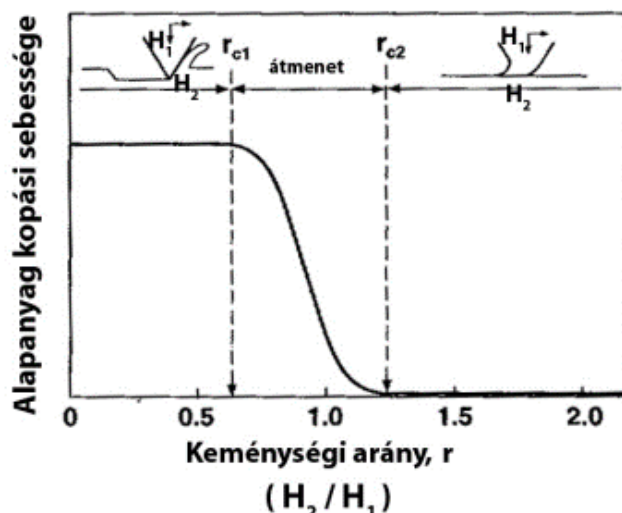
Abrázios kopás a műszaki felületek egyik kopási formája. Mechanizmusát tekintve elmondhatjuk, hogy két egymáshoz képest relatív elmozdulást végző felület esetében a keményebb felület érdességi csúcsai a puhább felületen árkokat, barázdákat húznak. A barázda alakja és mérete több tényezőtől is függ: empirikusan elfogadott tény, hogy a koptató felület keménységének legalább 1,2-szer keményebbnek kell lennie, hogy a másik felületen karcot okozzon. Ha a kopó felület képlékenyalakítási hajlama nagy, akkor a barázdaképződésnél az anyag nem csak kopadékként, hanem két oldalt (képlékenyalakítás hatására) kitüremkedik. Ha a koptatott anyag felülete rideg tulajdonságokkal rendelkezik, akkor a karcok széle ridegen törve növeli a kopadék mennyiségét (26. ábra). A gyakorlati életben sok esetben mindkét hatás jelentkezik (Hokkirigawa, Kato, 1988).



26. ábra Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a különböző abrázios kopási módokról (Hokkirigawa, Kato, 1988)

Ezt a jelenséget többen is kutatták: legjelentősebb véleményem szerint ezek közül Khrushchev és szerzőtársának 1970-es (Khrushcev, Babichev, 1970) valamint Rabinowicz 1983-as (Rabinowicz, 1983) munkássága, akiknek sikerült definiálniuk egy keménységi viszonyszámot a koptató és koptatott anyag keménysége segítségével. Vizsgálatukkor megállapították, hogy két jellemző keménységi arányt kell figyelembe venni a koptatás esetén a 27. ábra alapján:

- 0,5-0,8 keménységi aránynál kisebb értéknél, illetve 1-1,4 keménységi hányadosnál nagyobb értéknél a kopási sebesség állandó,
- a két érték között a kopási sebesség értéke függ a kopási hányadostól.



27. ábra Abráziós kopás és keménységi arány kapcsolata (Rabinowicz, 1983)

Rabinowicz (Rabinowicz, 1983) javaslatára a szakirodalom 1983-ban átvette az Archard formulát (Archard, Hirst, 1956) abráziós kopás esetére is, mivel az jól közelíti a kopadék mennyiségét az enyhe kopás szakaszában (15):

$$V = k \frac{F_n}{HB} L. \quad (15)$$

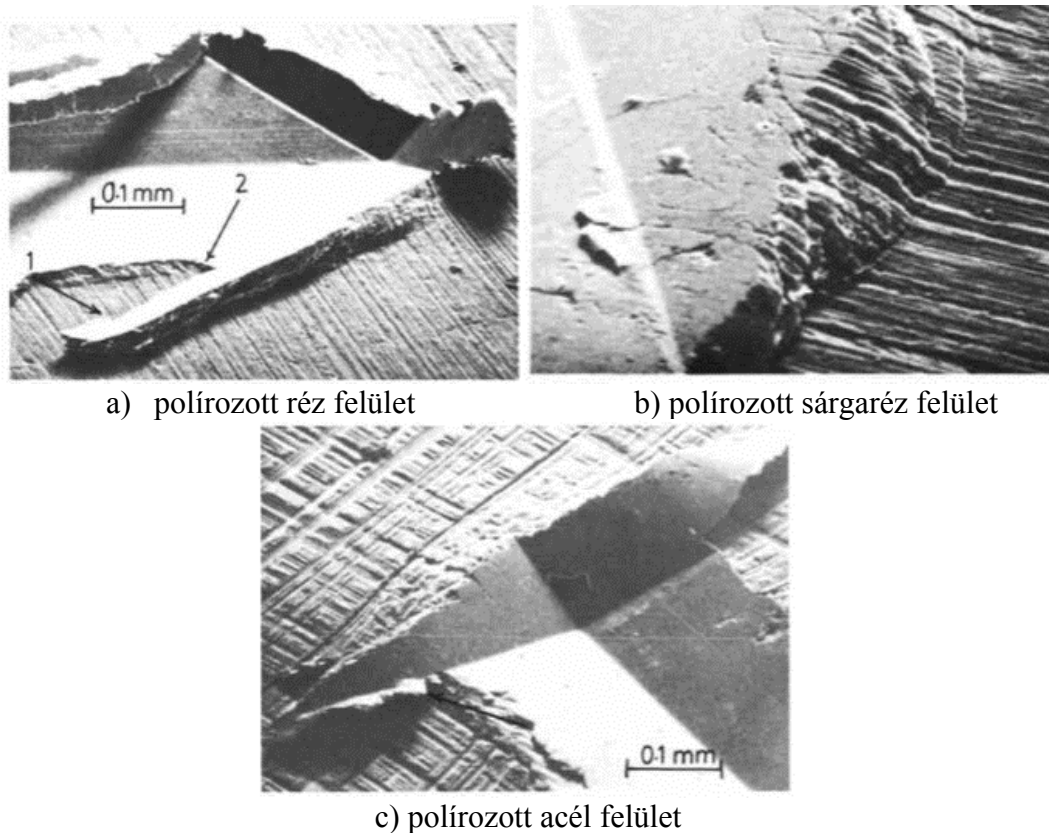
Rabinowicz és Hokkirigawa munkásságát tovább fejlesztve, Stout, Whitehouse munkássága alapján indította el négy részes cikksorozatát Zhang Bo és Xie You-Bai. A szerzők 1989-ben megjelent cikkükben (Bo, You-Bai, 1989a) első lépésben kétdimenziós érdességi modellt állítottak fel. Írásukban kiemelik, hogy a profil érdesség változása az alkatrészek működését nagymértékben befolyásolja a kezdeti kopás szakaszában. Munkájukban különböző keménységű anyagok érdességi profiljánál feltételezték, hogy az abráziós kopás során a keményebb felület érdesség csúcsa tökéletesen elnyírja a lágyabb felület érdességi csúcsát. Vizsgálatukat a PHDDF (profil magasság irányú ponteloszlási sűrűségfüggvény) segítségével végezték el Gauss eloszlást feltételezve a keményebb felületnél (a lágyabb felület tökéletesen sima volt). Algoritmusuk eredményeként megállapították, hogy a kopási úthossz függvényében a felület érdesebb lesz a kopás kezdeti szakaszán, majd az Ra értéke konstans lesz.

Hasonló eredményre jutottak cikksorozatuk második részében is (Bo, You-Bai, 1989b), ahol kiemelték többek között azt is, hogy a numerikusan megoldott problémánál a súrlódási úthossz kis terhelések esetében nem befolyásolja az állandósult mikrotopográfia érdességét. A cikksorozat első két részében az abráziós karcok alakjának változását – szélesedését és mélyedését – olyan matematikai modell segítségével definiálták, melynél a két felület egymáshoz képesti elmozdulása ciklusonként állandó volt. Modelljeik eredményéből látható volt, hogy a ciklusszámmal a kopadék mennyisége nőtt.

A szerzők a cikksorozat harmadik részében (Bo, You-Bai, 1989c) az előző matematikai formulákat felhasználva modelljüket úgy módosították, hogy szakaszos koptatáskor a leválasztott anyagmennyiség (kopadék) mennyisége állandó, s felhívták a figyelmet, hogy a kopás kezdeti szakaszának a leírása ennek a modellnek a segítségével pontosításra került az előző eredményeikhez képest.

A cikksorozat negyedik részében (Bo, You-Bai, 1989d) Bo és szerzőtársa a modell által szolgáltatott eredmények alapján különböző geometriájú (félgömb és kúp) szemcsék esetén meghatározta a súrlódási tényező változását. Modelljük alapján elmondhatjuk, hogy a terhelés és a mikrotopográfia érdessége is befolyásolja a súrlódási tényezőt olyan felületek esetén, melyeknél a pontok függőleges irányú eloszlása Gauss függvény szerinti.

Torrance gyakorlati mérések segítségével állított fel modelleket abrázíós karcok leírására (Torrance, 1981). Kísérleteinél azt vizsgálta, hogy különböző keménységű anyagok karcolásakor hogyan változik az anyagleválás és a karcok szélén a kitüremkedés polírozott réz (28.a ábra), polírozott sárgaréz (28.b ábra) és polírozott acél (28.c ábra) felületek esetén.



a) polírozott réz felület

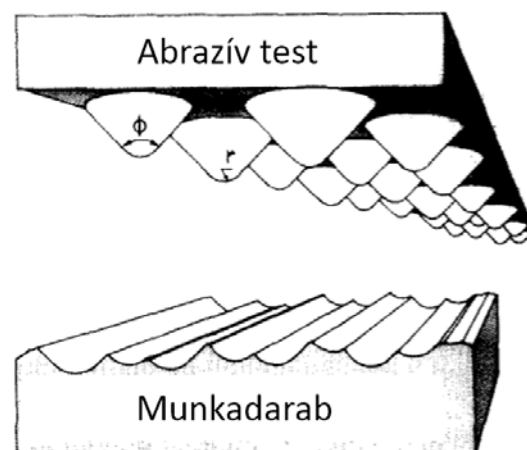
b) polírozott sárgaréz felület

c) polírozott acél felület

28. ábra Abrázíós karcok alakjának változása az anyag keménységének függvényében (Torrance, 1981)

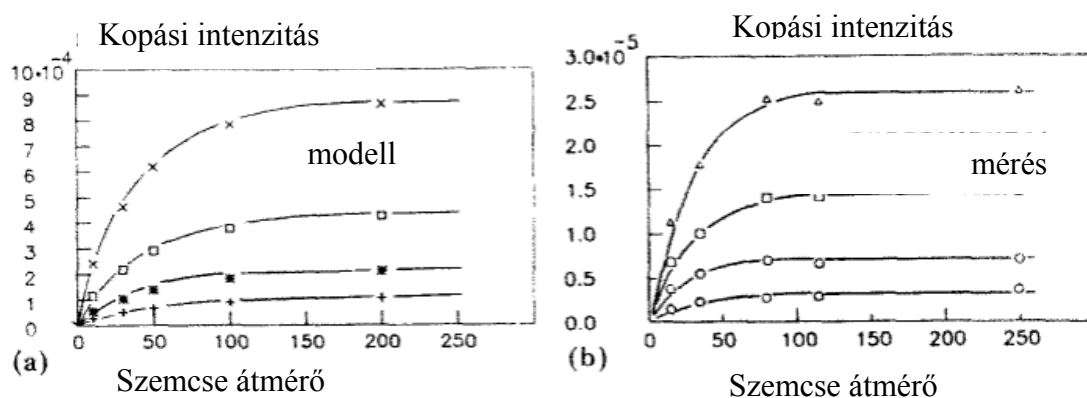
A kialakított új modelljében az erő és a keménység függvényében meghatározta a kopadék mennyiségét, valamint azt az anyagmennyiséget, mely a karcok szélén képlékeny alakítás miatt nem nyíródott le.

További modellfejlesztés figyelhető meg Jacobson és munkatársai 1988-as cikkében (Jacobson et al., 1988) ahol már a több abrázíós szemcse együttes hatását vizsgálták a 29. ábra szerint. Vizsgálatukban az abrázíós szemcsék adott lekerekítéssel rendelkező kúpok, a lágyabb anyag pedig orientációval rendelkező nem mérésen alapuló mikrotopográfia.



29. ábra Jacobson által vizsgált munkadarab és abrázív szemcséket tartalmazó koptató felület (Jacobson et al., 1988)

Szimulációjuk eredményeit valós kísérletekkel hasonlították össze. Az eredményeket tekintve egy új statisztikai alapokon nyugvó rendszert valósítottak meg, melynek eredményeit (30.a ábra) a valósággal összevetve (30.b ábra) hasonló lefolyású görbéket kaptak. Modelljüknél a kopás kezdeti szakasza és az állandósult kopási intenzitás jól megkülönböztethető a szemcseméret függvényében.



a) szimulációs eredmény

b) kísérleti eredmény

30. ábra A Jacobson-modell és a mérési eredmények (Whitehouse, D.J., 1994)

A sztochasztikus számolási módszerek elterjedésével a fentebb sorolt modelleket tovább lehetett vizsgálni. Az 1960-80-as évek kutatóinak eredményeit és megfontolásait Fang és munkatársai foglalták össze (Fang et al., 2004) és fejlesztették tovább: munkájuknál Monte-Carlo-módszer segítségével helyezték el az abráziós szemcséket és vizsgálták a karcépződést. A karcok ilyen típusú meghatározása mellett Böklin (Böklin 1973), valamint Azarkhin és Richmond (Azarkhin, Richmond, 1992) által meghatározott barázdaalakokat vettek figyelembe, majd eredményeiket tribológiai kísérletekkel igazolták. Ezzel az eljárással egy új irányvonalat definiáltak az abráziós felületek kiértékelése témakörben. További munkájuk során háromdimenziós végeselemes modell által szolgáltatott eredményekkel pontosították a Böklin és Azarkhin kutatási irányvonalat.

Pellegrin (Pellegrin, Stachowiak, 2004) is statisztikai módszereket alkalmazott a szemcsék elhelyezkedését illetően, de változtatta a szemcsék alakját is. A különböző alakú szemcsék hatására megfigyelte, hogy a kopási intenzitás változik. Munkájában külön felhívja a figyelmet arra, hogy a kezdeti mikrotopográfia alakja is befolyással van a kopási intenzitásra.

2.6. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

Az előző fejezetek alapján megállapítható, hogy a felületi érdességmérés technológiája és kiértékelési rendszere teljes körűen szabványosított a megmunkált felületek esetében. Tribológiai rendszer vizsgálatokor elmondhatjuk, hogy az egyes modellkísérletek leírásával és jellemzésével bővelkedő szakirodalom a kopás kezdeti szakaszának vizsgálatokor sok szempontból nem, vagy nem megfelelő mélységben végez vizsgálatokat. A szakirodalmat megvizsgálva a következő észrevételeim vannak:

1. A szakirodalmat tekintve elmondható, hogy a szimulációs modellek az évtizedek során egyre jobban jellemzik a kopás kezdeti szakaszát. Az egy, illetve több elméleti szemcse által definiált karc, illetve karcok a felület minőségét módosítják, de általánosságban a szemcse tökéletes nyírást végez (csúcszónában képlékeny alakítás nincs). A kopás kezdeti szakaszában kapott modellkísérlet eredmények ezekkel a szimulációs eredményekkel nehezen kapcsolhatóak össze, ugyanis:

- az abrazív szemcse alakja,

- az abarazív szemcsék elhelyezkedése,
- az egyes szemcsék által létrehozott karcok

a szimulációs modellbe jelenleg nem kerültek beépítésre.

2. A modellek és a mérések kiértékelésekor a kutatói gyakorlatban elmondható, hogy nem terjedt el széles körben a mikrotopográfiai szempontú kiértékelés. Profilméréskor a kopás kezdeti szakaszában az abráziós karcok különböző mélységének befolyásoló hatását sokszor nem veszik figyelembe befolyásoló tényezőként. A szakirodalom utalást tesz arra vonatkozóan, hogy a mikrotopográfiai mérés több információtartalommal bír, de jelenleg a tribológusok elterjedten az elektronmikroszkópos képeket használják.

3. A modellkísérleteken alapuló eredmények jellemzően csak néhány mérési ponttal reprezentálják a bekopási szakaszban az érdességi paraméterek változását, így általában csak trendeket jelölnek ki a paraméterek változásánál és nem közelítik azokat adott körülményekre érvényes vagy adott matematikai alakkal közelíthető függvényekkel.

4. jelenleg a kopás kezdeti szakaszának végét előrejelző paraméterek nem kerültek definiálásra.

A felsorolt hiányosságok megoldása, valamint az érdességmérési technikák és a tribológiai vizsgálatok még szorosabb összekapcsolása vezetett dolgozatom megírásához és a tézisek megfogalmazásához.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben mutatom be a munkám során fejlesztett szimulációs algoritmus működését, valamint az algoritmus eredményeinek ellenőrzésekor használt műszereket, berendezéseket és a megvalósított kísérlettervet.

3.1. A csonkoló algoritmus

Az algoritmus megvalósításakor törekedtem arra, hogy alkalmazható legyen profil és mikrotopográfiai mérés adatainak a feldolgozására is, hiszen fontos célkitűzés annak vizsgálata, hogy mely kiértékelési technika jelentheti az alapját egy abráziós kopási szimulációnak. A fejezetben a magyarázó ábrák csak a mikrotopográfiai alkalmazást szemléltetik, de az algoritmus alkalmazható profilmérésnél is. Az eredmények fejezetben igazolom a mikrotopográfiai mérések előnyeit a profilméréssel szemben.

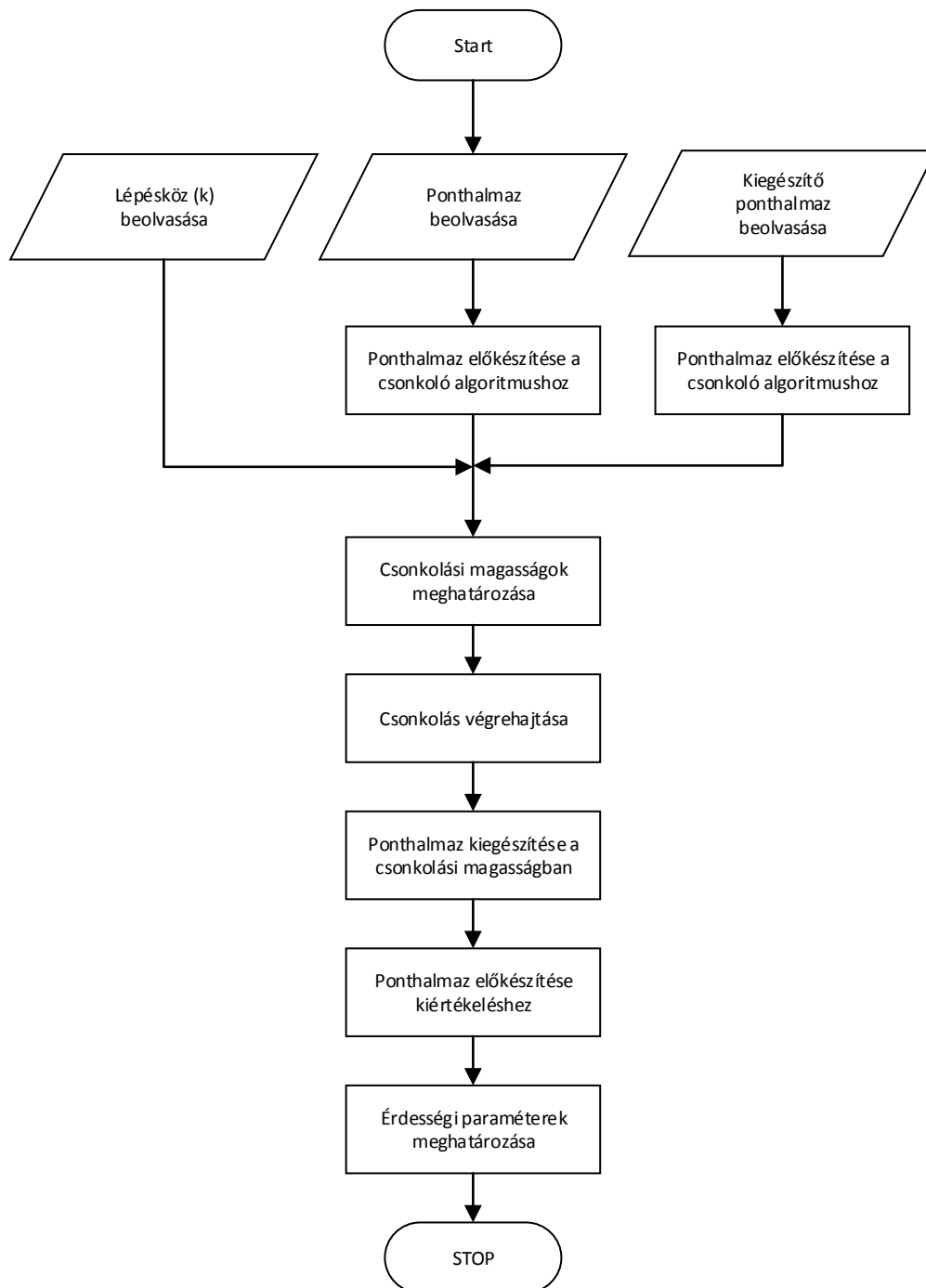
Szakirodalmi forrás alapján elmondható (Kozma, 1994), hogy szilárd testek esetében a kopás kezdeti szakaszát a hullámossági csúcsokra szuperponálódó érdességi csúcsok definiálják. Az abrázív ellenfelület folyamatosan karcokat képez a csúcsonával, ezzel folyamatosan megsemmisítve és átalakítva azt (31. ábra).



31. ábra Egy kopott alkatrész fémmikroszkópos képe a vízszintes előtolási nyomokkal és a csúcsonában a függőleges karcokkal

A kopás kezdeti szakaszának a végén az eredeti mikrotopográfia teljesen megsemmisül és az alkatrész felületi minőségét továbbiakban a kialakuló új karcok jellemzik.

Az általam fejlesztett algoritmus (32. ábra) a gyártott felület érdességméréssel történő beolvasása után (azt pontthalmazként kezelve) a csúcsonát adott matematikai összefüggés alapján csonkolja és a csonkolási magasság felett elhelyezkedő pontokat egy a mikrotopográfiát kiegészítő pontthalmaz elemeivel egészíti ki a csonkolási magasságnál. Érdeemes megjegyezni, hogy a műszaki gyakorlatban megengedhető kis intenzitású, ún. enyhe kopási folyamatokban (mild wear) nem következik be olyan mértékű kopás, mely azonnal megsemmisíti az eredeti topográfiát, így annak mikrotopográfiai sajátosságai megfigyelhetők szinte a teljes bekopási szakaszon.



32. ábra A csonkoló algoritmus felépítése

3.2. A ponthalmaz előkészítése a csonkoló algoritmushoz

A kutatói munkámban alkalmazott Mahr metszettepintós érdességmérő műszer gyári szoftvereinél (Marsurf XCR 4.5-07.3 és Marsurf XT 4.00-11.1) és ezek elődverzióiban nincs lehetőség csak a mérési pontok elmentésére pontfelhőként további felhasználás céljából. Az ipari gyakorlatot támogatva természetesen menthetőek szűrt és szerkesztett mérési eredmények is, de ebben az esetben a pontok magassági koordinátáinak mentése nem lehetséges. Az algoritmusnak ezért el kell végeznie a szükséges szűrési feladatokat.

Az egyes szűrési megoldások segítenek abban, hogy a mérési adatokból megkapjuk az alakhibát, a hullámosságot és az érdességet. A szűrés megvalósítására az alábbi módszerek állnak rendelkezésre:

- vonatkoztatási hossz alapú szűrés,
- mechanikus szűrés,
- elektromos szűrés,
- matematikai módszerekkel történő szűrés.

Az informatikai fejlődés és a számítástechnikai eszközök térhódítása természetesen a kiértékelési technikában is jelentős változásokat okozott. Napjainkban a kutatói életben és az ipari gyakorlatban az alábbi szűrési megfontolások alkalmazhatóak:

- szűrés középvonalas rendszerben (pl. Gauss, 2RC szűrők),
- szűrés burkolóvonalas rendszerben (pl. motif szűrő),
- egyéb szűrők (pl. wavelet-, Fourier szűrők).

A mérőrendszerek két szűrési eljárással (két vágási hullámhossz segítségével) határozzák meg az alakhibát, hullámosságot, érdességet (Horváth, 2008).

A szűrési beállításoktól függően a szűrés után egy megfelelő információtartalommal rendelkező ponthalmazt nyerünk, mely a további kiértékelés végett profilmérésnél a középvonalra, mikrotopográfia esetében pedig középsíkra van normálva. A szűrési megfontolásaim értékelésével részletesen az Eredmények fejezetben foglalkozom.

3.3. A csonkolási magasság meghatározása a lépésköz függvényében

A csonkolási magasság meghatározására több lehetőség áll rendelkezésre:

- a mikrotopográfia lineáris felosztása a csonkolási szám függvényében,
- a mikrotopográfia nem lineáris felosztása a csonkolási szám függvényében.

A lineáris osztásközű csonkolási magasság meghatározása az érdességi paraméterek segítségével könnyen meghatározható. A szabvány által definiált S_p és S_v paraméterek (maximális csúcsmagasság és völgymélység) különbsége megadja függőleges irányban a két legtávolabbi pont távolságát. Ez a felosztás viszont a gyakorlati szempontokat figyelembe véve nem szolgáltat releváns információkat arra vonatkozóan, hogy az alkatrész a kezdeti kopásnak mely szakaszában van.

A gyakorlati szempontú megközelítést tekintve – amennyiben a tribológiai folyamatban résztvevő felületek alak és helyzethibáitól eltekintünk – elmondható, hogy a kopadék mennyisége időegységre vonatkoztatva állandó, így a nemlineáris osztású csonkolási magasság használata pontosabb eredményt szolgáltat (34. ábra).

Az állandó térfogattartomány eltávolítású modell megvalósításához szükségünk van a mikrotopográfia pontjai segítségével meghatározott ösztérfogatra, mely a kopás kezdeti szakaszának végén eltávolításra kerül (megsemmisül az eredeti mikrotopográfia). A térfogati integrál folytonos függvényként az alábbi alakban írható fel (16):

$$V = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} (Z(x, y) + S_v) dx dy . \quad (16)$$

A (16)-es egyenlet diszkrétizált alakja (17) egyenlet, amennyiben a lépésköz a mérésnél mindkét irányban állandó:

$$V = \Delta x \cdot \Delta y \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [Z(x_i, y_j) + S_v] . \quad (17)$$

Az egy lépésben eltávolítandó térfogat (18) szerint, “k” lépésköz esetén:

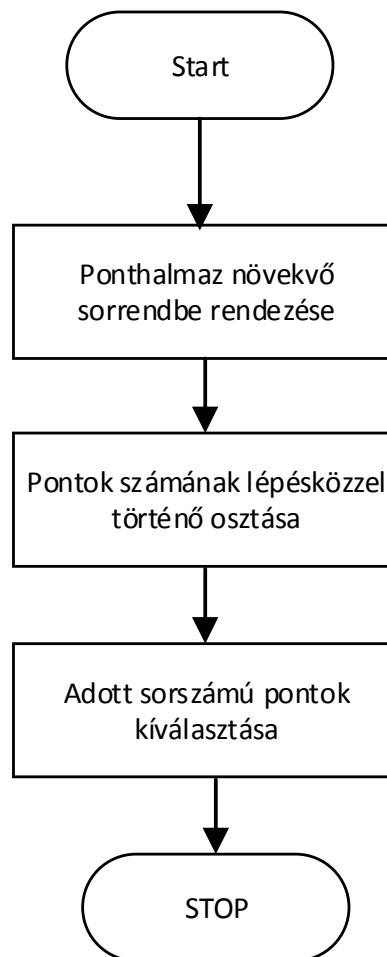
$$\frac{V}{k} = \frac{\Delta x \cdot \Delta y \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [Z(x_i, y_j) + S_v]}{k} \quad (18)$$

A szeletelési magasság:

$$h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot (M-1) \cdot (N-1) = \frac{\Delta x \cdot \Delta y \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [Z(x_i, y_j) + S_v]}{k} \quad (19)$$

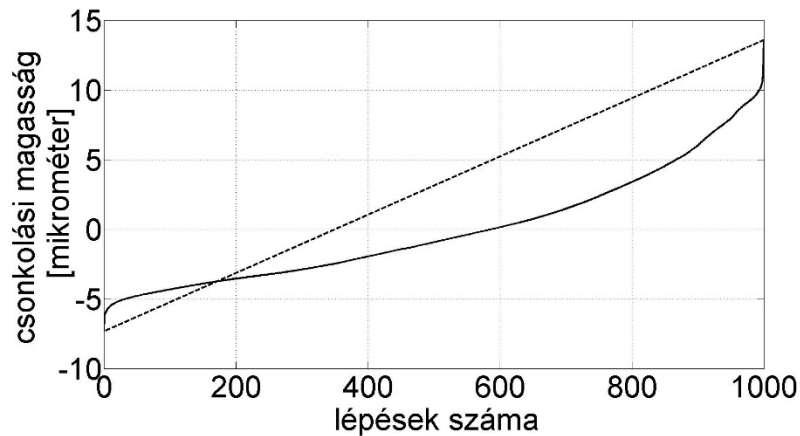
$$h = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [Z(x_i, y_j) + S_v]}{k \cdot (M-1) \cdot (N-1)} \quad (20)$$

A (20) egyenlet alapján a számlálóban csak a pontok magasságösszege szerepel. Ezeket a pontokat növekvő vagy csökkenő sorrendbe rendezve a pontok számának és a lépésköznek a segítségével kapjuk meg a csonkolási magasságot. A 33. ábra szemlélteti a csonkolási magasság meghatározásának folyamatábráját.



33. ábra A csonkolási magasság meghatározása

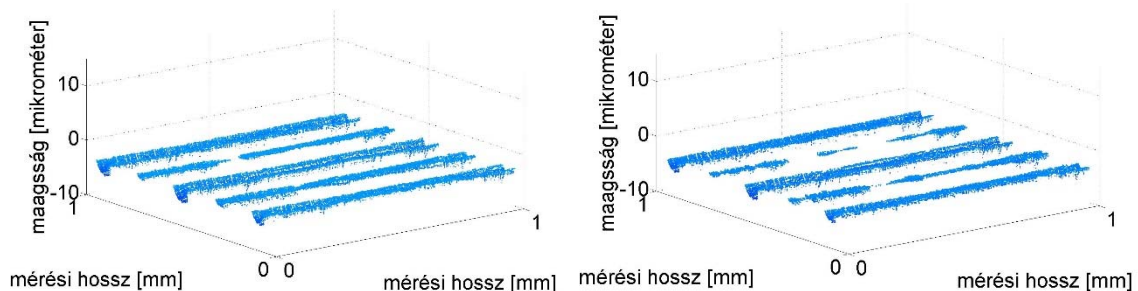
A 34. ábra a megsemmisített térfogathányad függvényében mutatja meg a csonkolási magasság alakulását a lineáris osztású és az adott térfogatot eltávolító modell között 1000 lépéses analízis esetén ütökéses mikrotopográfiára.



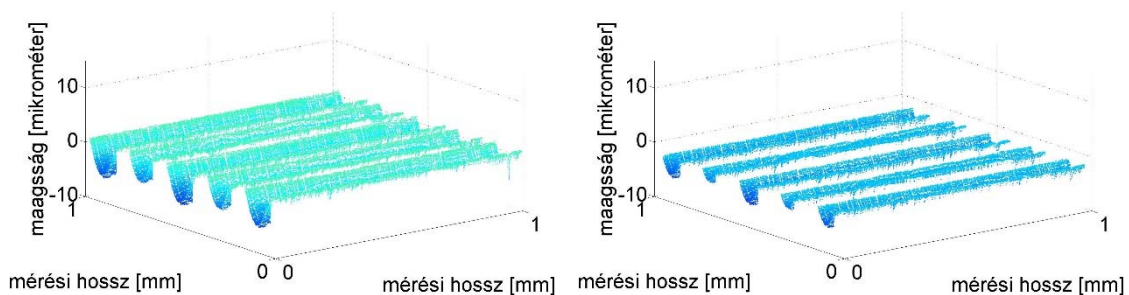
34. ábra A lineáris (szaggatott vonal) és térfogatállandó (folyamatos vonal) lépésköz esetén alkalmazható csonkolási magasság

A két megfontolás közötti különbséget jól szemlélteti például a 600. lépésnél a csonkolási magasságkülönbség (5 mikrométer) 20 mikrométer maximális magasság esetén.

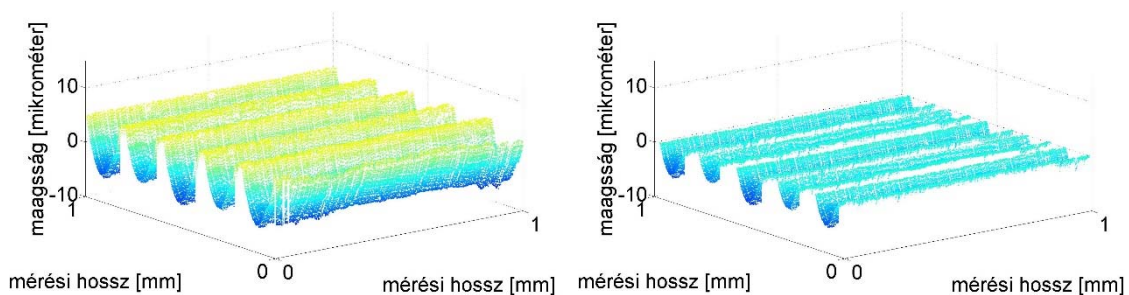
A modellek közötti különbséget láthatjuk egy 6 lépéses csonkolás esetén a 35.a-e ábrákon (A csonkolás első magassága a völgyzóna legalsó pontja, így ott mikrotopográfiai pont nem marad).



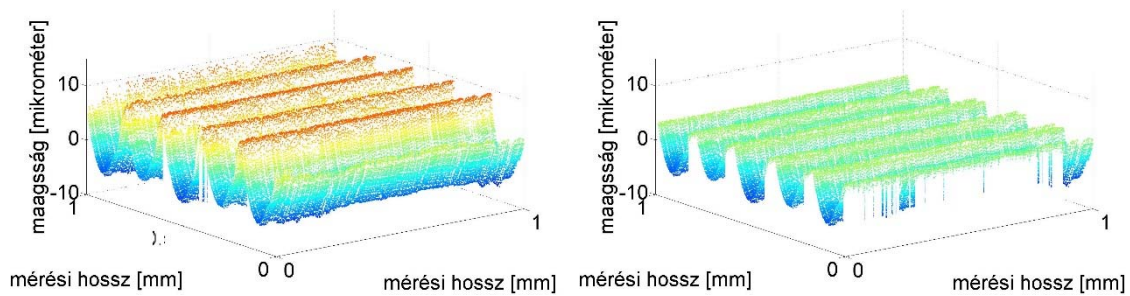
a) második lépés



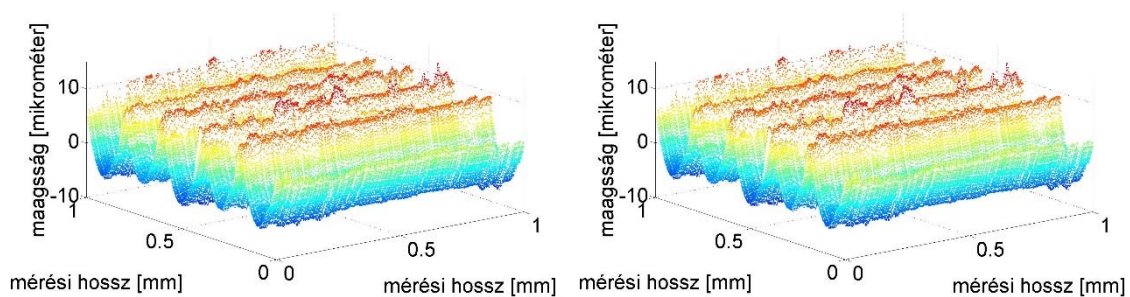
b) harmadik lépés



c) negyedik lépés



d) ötödik lépés



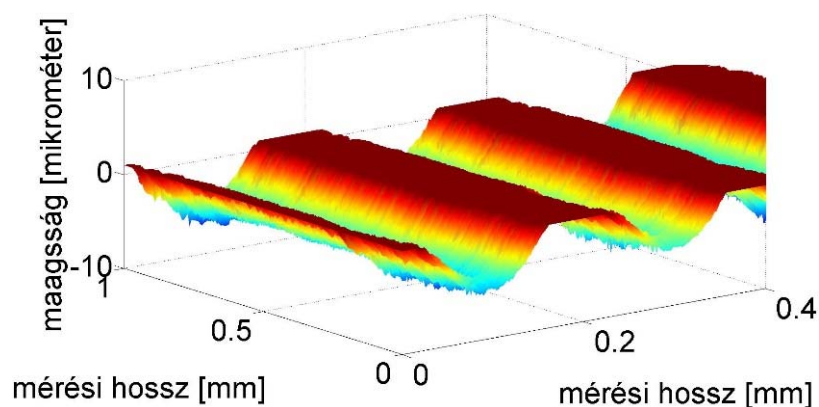
e) hatodik lépés

35. ábra A lineáris osztású (bal oszlop) és az állandó térfogategységgel (jobb oszlop) történő csonkolás 6 lépéses ütöképes mikrotopográfia esetén

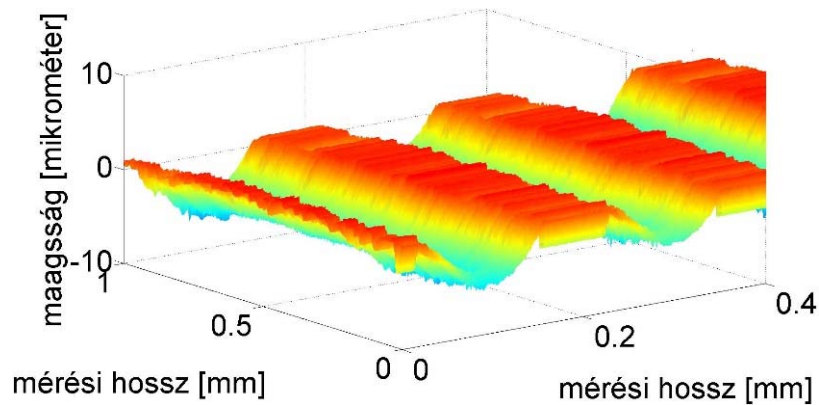
3.4. A ponthalmaz kiegészítése csonkolási magasságban

A ponthalmaz csonkolás után a csonkolási magasságban és a magasság felett nem tartalmaz pontokat. A mikrotopográfiát ezek után „össze kell foltozni”, a szerkesztett adatokat mérési pontokkal kell kiegészíteni. Ez a kiegészítés kétféleképpen történhet:

- Z =állandó síkkal történő kiegészítés (36.a ábra),
- abráziós mikrotopográfia adott pontjaival történő kiegészítés (36.b ábra).



a) foltozás z normálisú síkkal



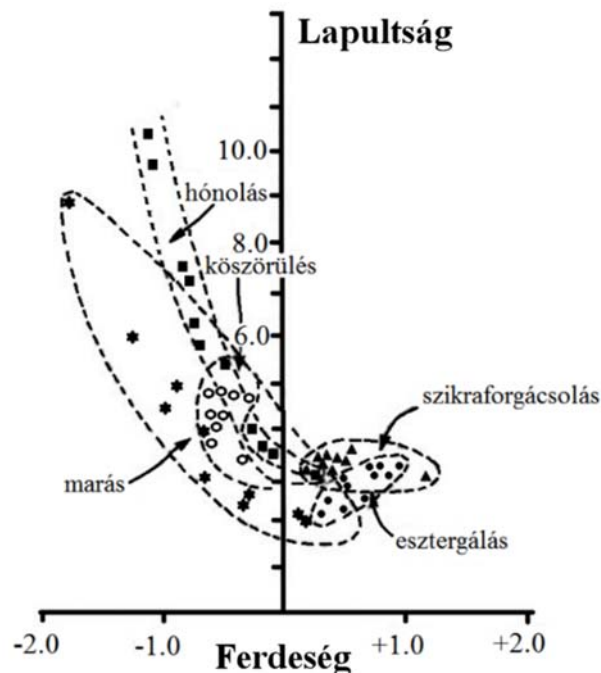
b) foltozás z abráziós karcokkal

36. ábra A mikrotopográfia foltozása

Minkét megoldás esetén egy feltételes utasítás használata indokolt. Amennyiben a csonkolási magasság felett helyezkedik el a ponthalmaz egy pontja, úgy abban a magasságba eltolt középsíkú helyettesítő ponthalmaz pontjával helyettesítendő, amennyiben a ponthalmaz pontja a csonkolási magasság alatt van, úgy a csonkolás után tovább vizsgált ponthalmaz pontja megegyezik vele.

3.5. A vizsgált érdességi paraméterek kiválasztása, az érdességi paraméterek meghatározása

A vizsgált paramétereket egyrészt a mérnöki gyakorlat, másrészt pedig a kutatói gyakorlat alapján választottam ki. A szakirodalom alapján elmondható, hogy a gyártott felületek kiértékelésekor széleskörűen alkalmazottak a pont magasságával kapcsolatos jellemzők (pl. R_a , R_q , S_a , S_q), valamint a pontok magasságirányú méreteivel kapcsolatos jellemzők (pl. R_{sk} , R_{ku} , S_{sk} , S_{ku}).

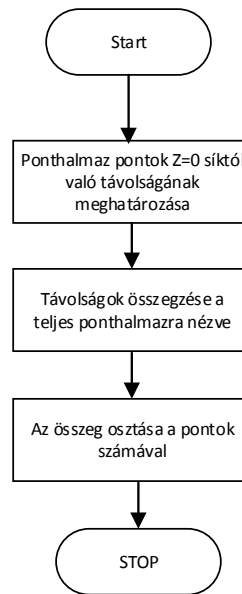


37. ábra A ferdeségi és lapultsági mérőszámok változása különböző megmunkált felületek esetében (Whitehouse, 1994)

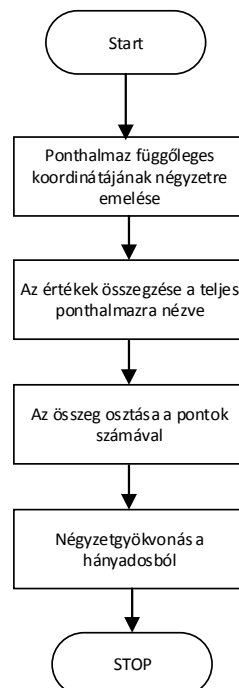
A felületek lapultsági és ferdeségi mérőszámait tekintve elmondható, hogy értékük a megmunkált felületek további működését nagymértékben befolyásolják (Whitehouse, 1994). A 37. ábrán látható koordinátarendszerben:

- jobbra és felfelé helyezkednek el azok a pontok, melyek kopási szempontból várhatóan kedvezőtlenebb jellemzőkkel bírnak,
- balra és lefelé helyezkednek el azok a pontok, melyek kopási szempontból várhatóan kedvezőbb jellemzőkkel bírnak.

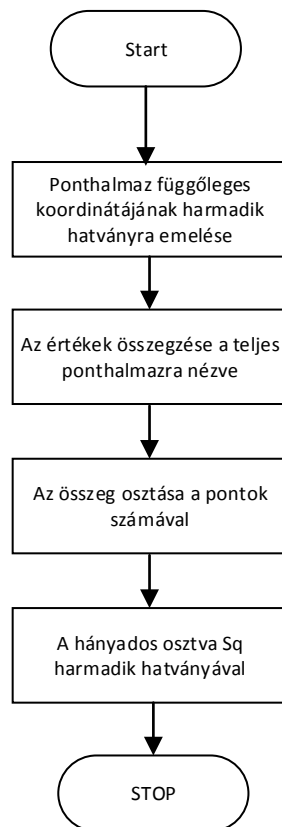
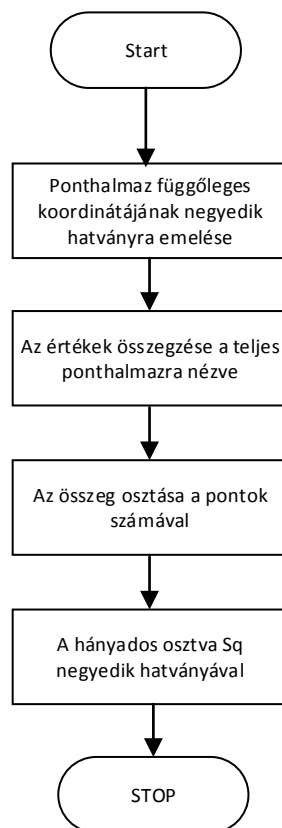
Az egyes mikrotopográfiai jellemzők meghatározásának folyamatábráját szemléltetik a 38-41 ábrák.



38. ábra Az S_a paraméter meghatározása



39. ábra Az S_q paraméter meghatározása

40. ábra Az S_{sk} paraméter meghatározása41. ábra Az S_{ku} paraméter meghatározása

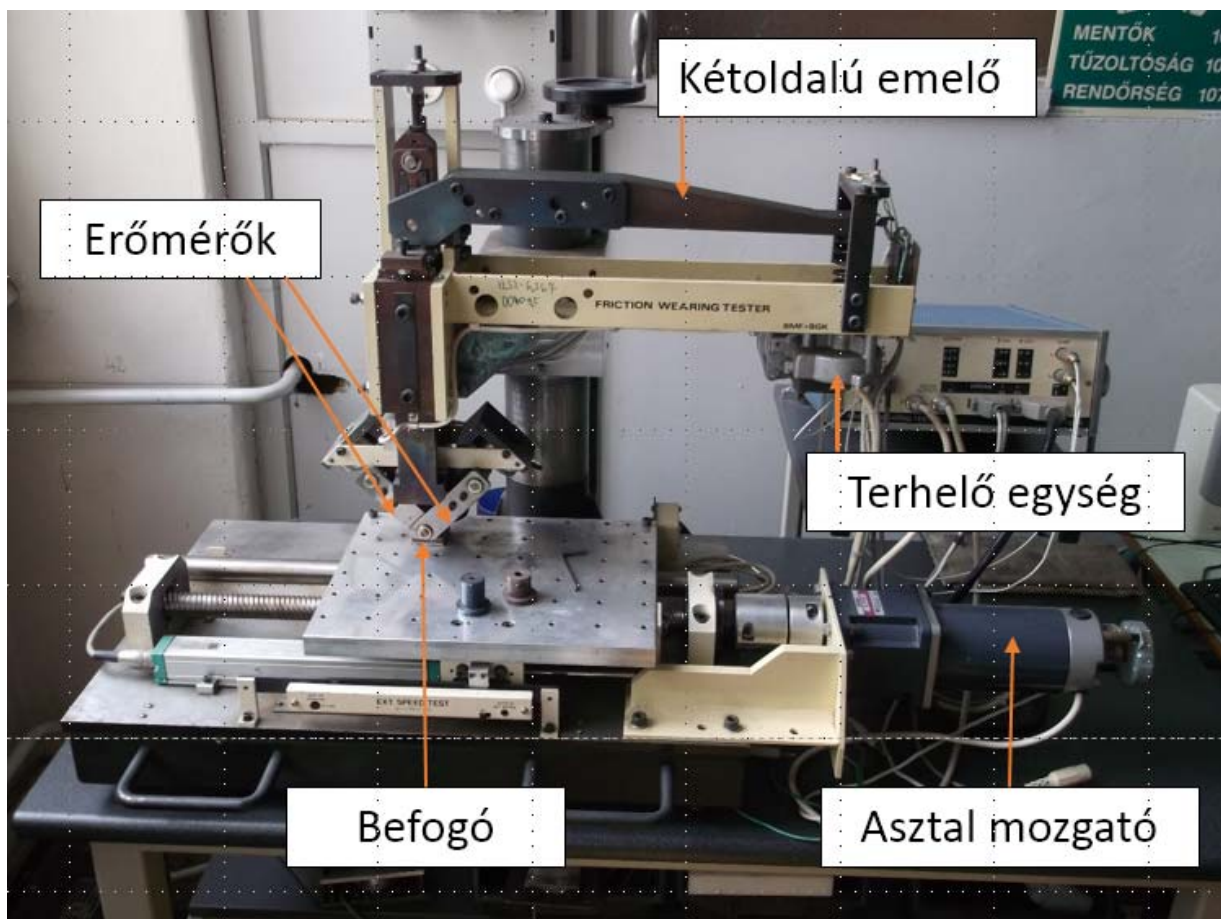
3.6. A koptatóberendezés

A 3.1 fejezetben ismertetett algoritmus validálásához koptatási kísérleteket végeztem. A koptatóberendezés az OTKA T-043151 pályázat keretén belül készült el a BMF Bánki Donát Gépészmérnöki Főiskolai Kar és a BME Gépészmérnöki Kar Gépszerkezettani Intézete közös fejlesztéseként.

A koptatóberendezés feladata, hogy a felső befogófejbe rögzített pogácsa alakú testet alternáló mozgás segítségével, 200 N és 2000 N közötti stabilan tartott normálerővel a munkaasztalra nyomja. A munkaasztal a beállított, maximum 180 mm-es hosszön alternáló mozgást 25 és 50 mm/s szakaszosan szabályozható sebességgel. A műszer vezérlése National Instrument által fejlesztett kártya és a pályázat keretein belül fejlesztett illesztőegység segítségével vezérelhető.

A műszer négy részből áll:

- mechanikai egység (42. ábra),
- külső illesztőegység,
- adatgyűjtő (DAQ: NI PCI-6221M),
- vezérlő, mérési adat gyűjtő szoftver.



42. ábra A koptatóberendezés mechanikai egysége

A mechanikai egység a normálerőt a függőleges oszlophoz rögzített kétoldalú emelő segítségével hozza létre. A mérés kezdetekor a mechanikus áttétel magasságának változtatásával meg kell érinteni a vizsgálandó darabot, majd a függőleges oszlopon

csavarkötés segítségével rögzíteni kell azt. A terhelést 1:10 áttételű laprugó segítségével adja át az egyenáramú motor a próbatestnek.

Méréskor a felső befogóba kerülő próbadarab befogó kardanikus felfüggesztésű, így biztosítja a felső befogóba és a munkaasztalra rögzített súrlódó pár párhuzamosságát.

A kardanikus felfüggesztésű befogóban a függőleges tengelyhez képest 45°-os szögben található két darab, egyenként 5000 N névleges terhelhetőségű Burster 8524-6005 típusú, teljes hidas nyúlásmérőbélyeges gyűrűcella. A gyűrűcellák trimmerpotenciométerrel nullázhatók, az általuk küldött jelek összegének $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -szerese adja meg a normálerőt, a jelek különbségének

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ -szerese pedig a súrlódó erőt.

Az asztal mozgatóját stabilizált egyenfeszültséggel táplált 200 mm méréstartományú Buster 8719-5200-as mérőpotenciométer méri, melynek hibája 0,05%. A hozzá tartozó jelkondicionáló középhelyzetben 0 V, a szélső helyzetekben pedig $\pm 4,5$ V feszültséggel rendelkezik (az érzékenység 0,05 V/mm). Az asztal sebességét a meghajtó motor impulzusszélesség modulációjával lehet elérni, melyet az adatgyűjtő kártya jele vezérel.

A mérőberendezés védelmét a szoftveres védelmen kívül négy végállás kapcsoló biztosítja, melyek közül bármelyik meg tudja szakítani a motor áramellátását.

Ezen felül a rendszer hibajeleket küld arról, ha:

- a terhelőelemnek túl nagy az elmozdulása (pl. hibás alkatrészbefogás miatt),
- felütözik a himba (túlzott terhelőerő növekedés),
- a mozgó motor túlterhelődésekor (pl. asztal megszorulás esetén),
- túlmelegszik a tápegység.

3.7. Az érdességmérő

Az érdességméréshez Marsurf GD 120 vontatóegységet alkalmaztam 90°-os csúcshögű tüvel. A használt mérőeszközzel kapcsolatban elmondható, hogy napjaink kontakt mérési elvű mérőrendszereinek egyik legelterjedtebben használt tagja. A mérési pozíciót mindhárom fő irányban szervomotoros pozicionálással lehet beállítani. Egy mérés akár 120 mm hosszú is lehet. A mért adatok kiértékelése többféle, jelenleg hatályos nemzetközi szabvány szerint történhet (ISO, JIS, ASME), így közel 100 paraméter meghatározására nyújt lehetőséget. A tanító programjának köszönhetően adott alkatrészen több pozícióban, vagy pedig egy alkatrészen, több helyen lehet mérést végezni, s a végrehajtott mérésekről statisztikai kiértékelést is kaphatunk. A mérés pontosságát a statikus és dinamikus kalibrálási lehetőségek is biztosítják.

Az GD120 felhasználását az alábbi feladatoknál ajánlják a gyártók:

- gépgyártásban:
 - csapágyak,
 - menetes rudak,
 - golyósorsók,
 - tengelyek,
 - állványok,
 - szelepek.
- autógyártásban:
 - hajtómű,
 - féktengely,
 - hengerfej,

- motorblokk,
- turbófeltöltő.
- gyógyszeriparban:
 - csipőprotézisok,
 - térdprotézisok.
- repülőgépiparban:
 - gázturbinaalkatrészek.
- optikai alkatrészeknél.

A műszer vízszintes lépésközének hibája 100000 lépésenként egy lépés távolság (5,6 mm vontatási hossz) 11200 ponton szokás mérni, azaz alapbeállítások esetén 1mm-en maximum 0,5 mikron a pozicionálási hibák összege).

A műszer pontosságát függőlegesen a felület érdessége határozza meg:

- ± 25 mikrométer maximális túelmozdulásnál: 0,7 nanométer,
- ± 250 mikrométer maximális túelmozdulásnál: 7 nanométer,
- ± 2500 mikrométer maximális túelmozdulásnál: 50 nanométer.

3.8. A próbadarab, csiszolóvászor és a kísérletterv

A próbadarab anyagválasztásakor fő szempontom volt a kísérletek eredményeinek gyakorlati szempontú felhasználhatósága. Az utóbbi évtizedek szakirodalmát tekintve elmondhatjuk, hogy a forgácsoló szerszám éltartam vizsgálatát hazánkban és Kelet-Európában „tradicionálisan” C45-ös normalizált hőkezelési állapotú anyagminőséget alkalmaznak (Bíró et al., 2011; Horváth, Lukács, 2015; Liska, 2011). Az anyagválasztás anyagtechnológiailag nézve indokolt, mert a normalizált hőkezelési állapotú 65-35-ös ferrit- perlit arányú, finomszemcsés szövetszerkezetű anyagminőség olcsó, könnyen beszerezhető és ennek a legkisebb keménység szórása, így a kísérletek reprodukálhatósága biztosított.

Napjaink tribológiai kísérleteit tekintve hazánkban egyre jobban elterjedt ez az anyagminőség tribológiai kísérleteknél is, mivel a gépiparban széleskörűen alkalmazott, könnyen beszerezhető anyag (Kovács, Solecki, 2008; Pinke, 2013; Zsidai, Kalacska, 2014).

A C45 anyagminőség a nemesíthető acélok csoportjába tartozik. Kereskedelemben rúd, henger, szélesacél, univerzálacél, finom- és durvalemez, valamint szalag alakban kapható. Felhasználását tekintve elmondhatjuk, hogy alkalmas szabadon alakított és süllyesztékes kovácsdarabnak, valamint gépalkatrészeknek, melyeket nem általános rendeltetésű szerkezeti acélból gyártanak.

A C45-ös acél EN10083/2-2006 szabvány szerinti vegyi összetétele a 3. táblázat tartalmazza, a méretétől függő mechanikai tulajdonságait a 4. táblázat foglalja össze.

3. táblázat A C45-ös anyagminőség fő ötvözői

ötvöző	C	Si	Mn	P	S
összetétel	0,42-0,5%	$\leq 0,4\%$	0.5-0.8%	$\leq 0,045$	$\leq 0,045$

4. táblázat A C45-ös acél mechanikai tulajdonságai

méret	Folyáshatár min.	Szakítószilárdság	Nyúlás
[mm]	[MPa]	[MPa]	[H, %]
0-16	340	≥ 620	14
16,1-40	305	≥ 580	16
40-100	275	≥ 560	16

A próbadarab megmunkálása Mas típusú horizontálmarón készült el a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Karának Gépműhelyében. A megmunkálás paramétereinek megválasztásánál céлом az volt, hogy a orientációval rendelkező mikrotopográfiát állítsak elő. Az általános rendeltetésű alkatrészek (tengelyek) kiemelt érdességi paramétere $Ra=3,2$ mikrométer. A forgácsolási műveletet a Korloy által kereskedelmi forgalomba hozott SDNCN 1010-E07 készzárral és DCMT 070204-HMP megszakított felületek megmunkálásához is ajánlott lapkával végeztem. A készzár és a lapka geometriai tulajdonságait szemlélteti a 43. és 44. ábrák.

SDNCN															
Katalógusszám: A405 530							Használható lapkák		Alkatrészek						
Méretkód	Irány N	W	L*	S*	h	l	DC□□	Csavar A430 010	Lapka-alátét A430 015	Csavar A430 010	Kulcs A430 025				
SDNCN	1010-E07	•	10	70	5	10	20	DC□□ 0702□□	FTKA02565	-	-	TW07P			
	1212-F07	•	12	80	6	12	20	DC□□ 11T3□□	FTGA03508	-	-	TW15P			
	1616-H11	•	16	100	8	16	30	DC□□ 11T3□□	FTGA03512	SD32S	SHXN0509F	TW15P, HW35L			
	2020-K11	•	20	125	10	20	30	DC□□ 11T3□□	FTGA03512	SD32S	SHXN0509F	TW15P, HW35L			

43. ábra A készzár kialakítása

Méretkód	Vágó anyagok							Méretek (mm)					Forgácsolási adatok		Alkalmas típusa	
	NC3010	NC3120	NC3030	PC8010	NC9020	PC9030	NC6110	NC6010	H01	l	d	t	r	d1		
DCMT 070202-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	7,5	6,35	2,38	0,2	2,8	0,03~0,12	0,10~1,50	SDACR/L
DCMT 070204-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	7,3	6,35	2,38	0,4	2,8	0,06~0,17	0,20~2,30	SDJCR/L
DCMT 070208-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	6,8	6,35	2,38	0,8	2,8	0,08~0,23	0,40~2,30	SDNCN
DCMT 11T302-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	11,4	9,52	3,97	0,2	4,4	0,04~0,22	0,10~2,00	SDQCR/L
DCMT 11T304-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	11,2	9,52	3,97	0,4	4,4	0,08~0,23	0,30~3,00	SDUCR
DCMT 11T308-HMP	•	•	•	•	•	•	•	•	10,8	9,52	3,97	0,8	4,4	0,10~0,30	0,50~3,00	SDZCR/L

44. ábra A lapka kialakítása

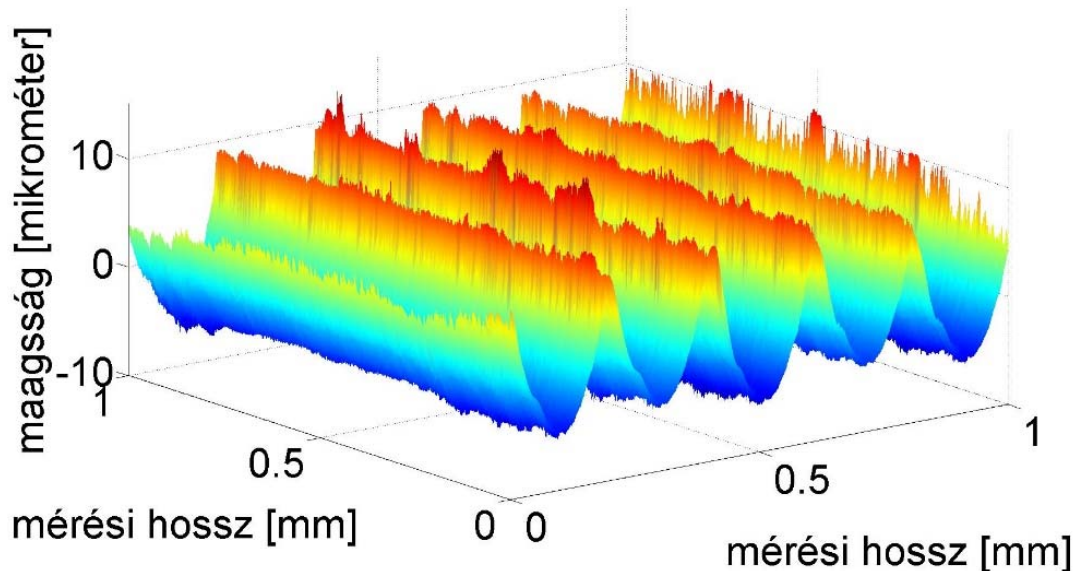
A gyártáskor alkalmazott paraméterek az alábbiak voltak:

- ütökéses megmunkálás,
- fordulatszám: 400 1/perc,
- előtolás: 150 mm/perc (0,2 mm/fordulat)

A kialakult mikrotopográfia képét és az érdességi paramétereket a 45. ábra és az 5. táblázat szemlélteti.

5. táblázat A gyártott mikrotopográfia érdességi paramétere

paraméter	Sa [mikrométer]	Sq [mikrométer]	Ssk [-]	Sku [-]
érték	3,222	3,9244	0,7599	2,7376



45. ábra A gyártott alkatrész mikrotopográfiája

Az abrázíós folyamatot a szakirodalmi cikkekben csiszolóváson segítségével hajtják végre. A csiszolóváson kiválasztásakor három fő szempontot kell figyelembe venni:

- a hordozóanyagot,
- a kötőanyag,
- csiszolószemcsék.

A hordozóanyag igénybevétele húzás, vagy húzás és hajlítás. Az anyagnak – amellet hogy ellenáll adott élettartamig az igénybevételnek – megfelelően rugalmasnak kell lennie. A gyakorlati életben a hordozóanyag általában papír, gyapjú, vulkánfíber.

A kötőanyag szerepe egyrészt az, hogy a szemcsék tapadását biztosítsa a hordozóanyagra, másrészt pedig, hogy a csiszolószemcséket tapadását biztosítja. A kötőanyag rugalmassága biztosítja a szemcsék kiszakadás elleni védelmét. A legelterjedtebb kötőanyag napjainkban a műgyanta.

A csiszolószemcsék feladata a felületek módosítása. A csiszolási folyamatnál előnyt jelent, hogy a csiszolóanyag (és természetesen a hordozó és a ragasztó anyag is) víz hatására ne oldódjon. A fémmegmunkálásnál legelterjedtebben alkalmazott abrazív szemcse a szilícium-karbid. A szilícium-karbid ellenáll a savas és lúgos kémhatású anyagoknak, 2300 °C-on elemeire bomlik.

Az abrázíós vizsgálatok végrehajtásához szükséges csiszolópapír kiválasztásában az Fk-Technika (2300 Érd, Gárdonyi Géza u. 34/A) által ajánlott típust használtam (46. ábra):

- Széria megnevezése:CK721X,
- finomság:1200,
- Hordozóanyag: erős poliészter,
- Kötőanyag: teljes műgyanta,
- Szemcsefajta, szóráskép: szilícium-karbid,
- Alkalmazási mód: sík és íves felületek csiszolása,

- Csiszolóanyag fajtája: szalag,
- Szalagvégtelenítés fajtája: V-07 fóliás,
- Megmunkálható munkadarab anyaga: Üveg, műanyag, gumi, kő, beton, acélöntvény, rézöntvény,
- Felhasználható terület: fémipar, üvegipar, építőipar,
- Csiszolási műveletek: sík-és körccsiszológépek, excenter-csiszológép.



46. ábra A kísérleteknél használt CK721X típusú csiszolópapír

A választott szériával kapcsolatban a teljes műgyanta kötőanyag azért is előnyös, mert a gyártáskor az abrziós szemcse nehezebben szakad le a felületről, mint a hagyományos (pl. fa) termékek csiszolásakor alkalmazott csiszolóvásznak esetében. A szemcséket a hordozóanyagon orientáltan helyezték el. A 46. ábra szerinti mintázat a műgyanta ágyat mutatja, melyben a csiszolószemcsék a felületen helyezkednek el. Az orientáció a súrlódási iránnyal 15° os szöget zár be, így a koptatás során a kialakult felület minimális távolságon belül eléri a teljes szélesség mentén homogén anyageltávolítást.

A szakirodalmat tekintve elmondhatjuk, hogy a vonatkozó témában nincs utalás arra vonatkozóan, hogy a kopás kezdeti szakaszának érdekesség szempontú vizsgálatát milyen kísérletterv típusokkal lehet/érdemes végezni, a szakirodalomban megoldási javaslatokat nem találtam. Jelenleg a szakirodalmi cikkek nagy százaléka trendet fogalmaz csak meg, aminek a segítségével csökkenő vagy növekvő tendenciákat definiál az egyes paraméterek között. A részletes vizsgálat végett így egy teljes faktoros kísérlettervet valósítok meg, melyben adott hossz és erőértékek mellett meghatározom az egyes érdekességi paraméterek értékét. Az így felépített kísérletterv segítségével (mivel próbafüggvény alakom a későbbiekben ismertetett csonkoló algoritmus segítségével határozom meg) 5 különböző erőérték mellett végzek vizsgálatot. Az útértékek meghatározásakor célom a minimum 5 úthosszon történő osztás megvalósítása, melynél:

- a kopási folyamat elején kisebb úthosszváltozást,
- a végén pedig nagyobb léptékű úthosszváltozást alkalmazok.

A gyártott felületeinket tekintve elmondható, hogy a csúcsonában mérhető szög 90° -nál biztosan magasabb (90° -os csúcshögű tapintófejjel történik a mérés), így a hordozófelületi görbét tekintve az egyes magasságokban a kopási folyamatban résztvevő anyagvastagság folyamatosan nő. A méréseket a teljes eredeti orientált mikrotopográfia megsemmisülésig végeztem. A megsemmisülést szemrevételezéssel állapítottam meg, mivel az abrziós karcok és az előtolási nyomok egymásra merőlegesen helyezkednek el.

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben először a bemeneteket határozom meg, majd a csonkoló algoritmus segítségével meghatározom az érdességi paramétereket. A kapott eredményeket érdességmérés segítségével ellenőrzöm.

4.1. Az algoritmus bemenetének meghatározása

A 3. fejezetben ismertetett csonkoló algoritmus bemenete többféle jel feldolgozására is alkalmas. Az algoritmus feldolgozhat hullámossági, érdességi, vagy szűretlen adatokat profil és mikrotopográfia esetében.

A bemenet célszerű megválasztása az előkísérletek alapján történt. A modell felépítésekor célom az volt, hogy a bemeneti jel minél kisebb szórással és variációs együtthatóval rendelkezzen, valamint tribológiai szempontból megfelelően írja le a bemenő jelet.

Jelen alfejezetben a gyakorlati szűrőtechnikai megfontolásaimat ismertetem röviden, majd a profil és mikrotopográfiai mérést hasonlítom össze abráziosan koptatott felületek esetében.

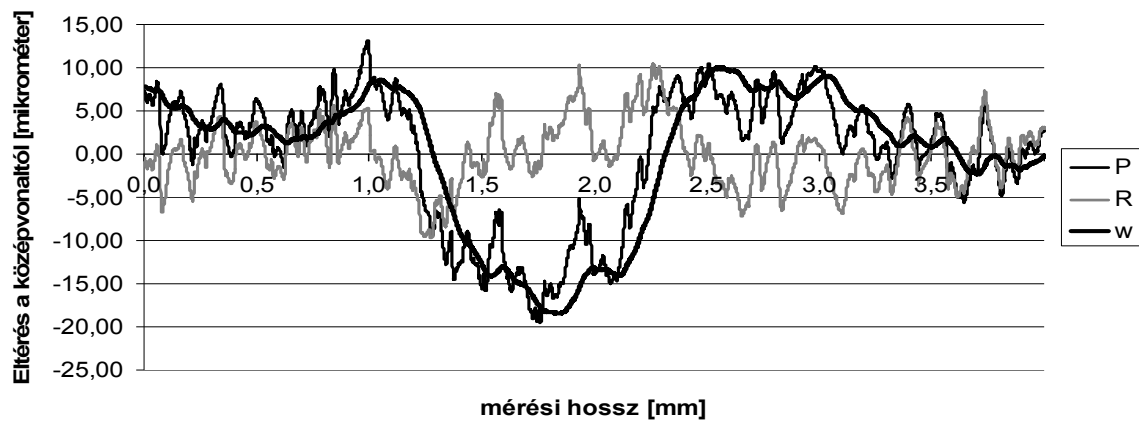
4.1.1. Az érdességi, hullámossági és elsődleges profil összehasonlítása

Az érdességi, hullámossági és elsődleges profil között a szűrési technika teremt kapcsolatot. A szűrés a gyártott felületek esetében azért nélkülözhetetlen, mert a hullámossági és az érdességi paraméterek a gyártást, mint komplex rendszert más-más szempontból jellemzik. Általánosságban elmondható, hogy a hullámossági paraméterek a szerszám-gép rendszerben a gép felől közelítik meg a felületminőséget: jellemzik a szerszám-befogó és a gép merevségét, megmunkálás közbeni rezgését. Az érdességi paraméterek a szerszám minősítésében játszanak szerepet: az érdességi profiljellemző alakját a szerszám csúcsa (lekerekítési sugara, érdessége) alakítja ki, de emellett az anyag szerkezete (kristálméret, ötvözők és a bázisfém keménysége), valamint a szerszámra tapadási hajlama (élrátét) is befolyásolja.

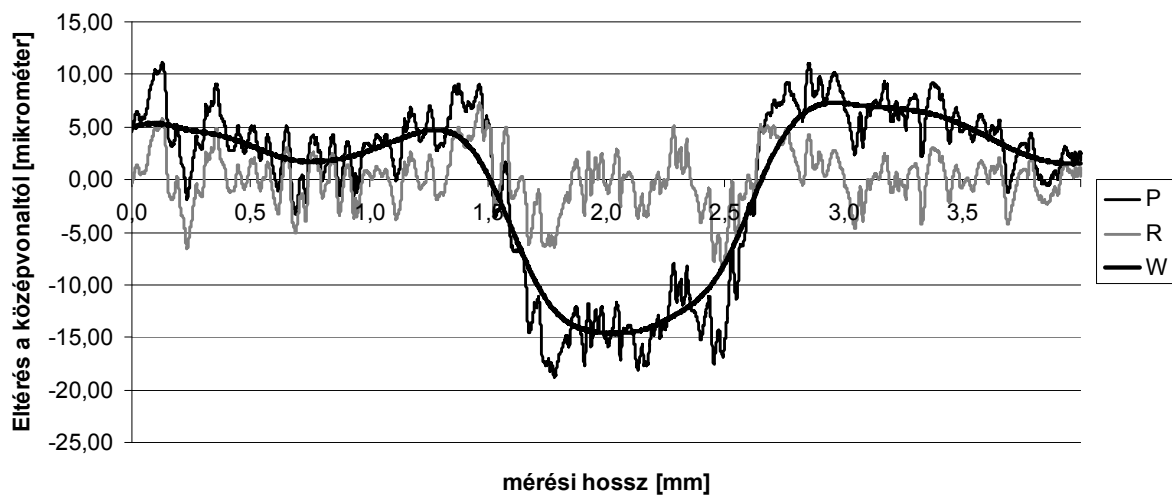
Az egyes szűrési megoldásokat az érdességi szabványok rögzítik. A szűrők átviteli karakterisztikáját napjainkban a digitális jelfeldolgozás ellenére is az elektronikában vagy a statisztikában alkalmazott átviteli függvények segítségével definiálták. Az alkatrészek minősítésekor széleskörűen alkalmazott Gauss szűrő, de a 2CR és a PC75 szűrő is folyamatos átviteli karakterisztikával rendelkezik, a digitálisan hullámtérbe transzformált jelet szigorú monoton függvény lefutással gyengíti a vágási hullámhossznak megfelelően. A különböző átviteli karakterisztikák különböző hullámossági és érdességi jelalakot definiálnak, melynek következtében az érdességi paraméterek változnak.

A szűrőválasztási megfontolásoknál VDI 27-es érdességi etalon mérését végeztem el. Az etalon nem rendelkezik orientációval, tehát a szűrő kiválasztás eredménye lehetőséget nyújt arra vonatkozóan, hogy olyan orientációval rendelkező megmunkált alkatrészek kopási folyamatát is jellemezzem, ahol az abrázios karcok magassága már számottevően befolyásolja a felület minőségét (két jellemző iránnyal rendelkező felület esetén).

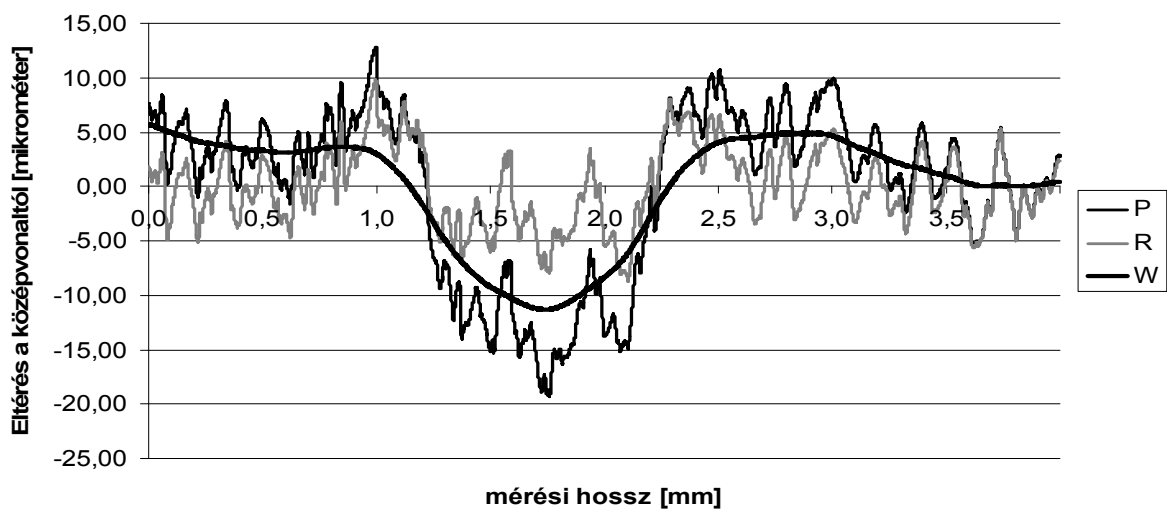
Az egyes profilokat és a mérnöki gyakorlatban használatos érdességi paramétereket a 47.-49. ábrák és a 6. táblázat szemlélteti 0,8 mm-es vágási hullámhossz esetén.



47. ábra A mért, az érdességi és a hullámossági profil 2RC szűrő alkalmazása esetén ($\lambda c=0,8\text{mm}$)



48. ábra A mért, az érdességi és a hullámossági profil Gauss szűrő alkalmazása esetén ($\lambda c=0,8\text{mm}$)

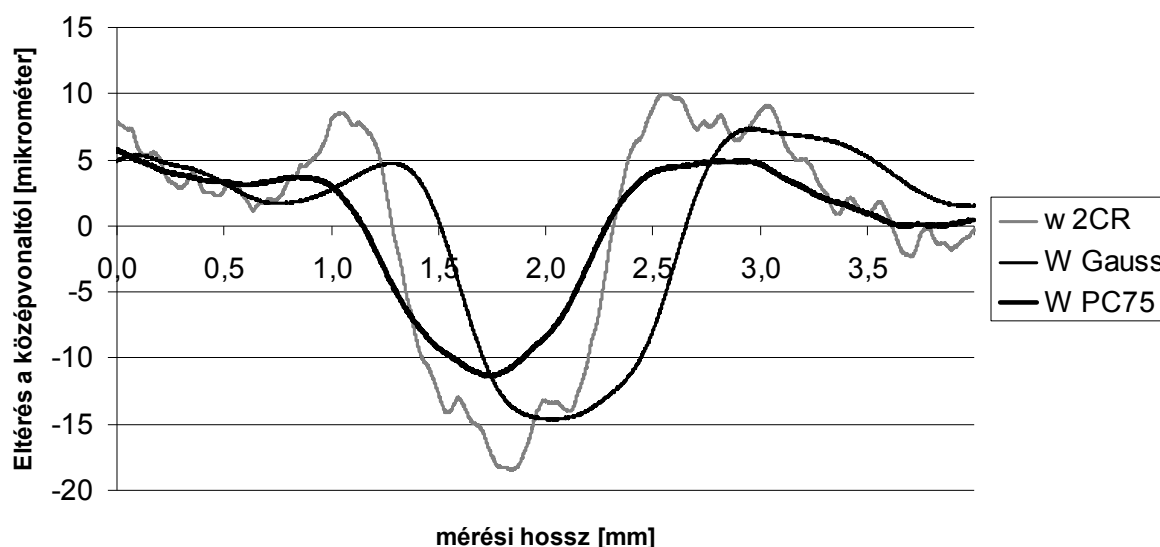


49. ábra A mért, az érdességi és a hullámossági profil PC75 szűrő alkalmazása esetén ($\lambda c=0,8\text{mm}$)

6. táblázat. Az érdességi paraméterek értékei az alkalmazott szűrési eljárás függvényében

Szűrő típusa	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	Rku	Rsk
Gauss	2,01	11,21	2,55	5,28	5,94	2,95	-0,19
2CR	2,8	12,71	3,49	6,43	6,28	2,59	0,18
PC75	2,95	12,83	3,42	6,79	6,04	2,07	0,04

Az 6. táblázat adataiból látható, hogy a szűrő átviteli karakterisztikája nagymértékben befolyásolja ugyanakkora vágási hullámhossz esetében is az R paraméterek értékét. Ez a változás természetesen megjelenik az 50. ábrán látható hullámossági (W) profilokon is.

50. ábra Különböző szűrők által meghatározott hullámossági profil ($\lambda c=0,8\text{mm}$)

A kezdeti eredmények alapján elmondható, hogy a gyártott alkatrészek minősítésére elterjedten alkalmazott érdességi (R) paraméterek használata nem célszerű. Az így kapott eredmények és a szűrő karakterisztika segítségével az elsődleges (P) profil nem nyerhető vissza a folyamatos átviteli görbével rendelkező szűrő karakterisztika miatt, azaz csak hullámossági és csak érdességi szempontú elemzésnél az egyes jelösszetevők nem választhatóak el egyértelműen egymástól. Ugrásfüggvény karakterisztikájú szűrők jelenleg szabványosítva nincsenek, megvalósításuknak tetszőleges hullámhossz értékénél gátat szab a Shannon-tétel. A teljes rendszerszemléletű kiértékelés miatt ezért a hullámossági (W) és érdességi (R) profilt is tartalmazó elsődleges (P) profilt alkalmazom a továbbiakban a kiértékeléskor, az alakhibát pedig a továbbiakban, – mivel sík felületi megmunkálást választottam vizsgálatomkor és így alakhibaként egyenesség illetve síklapúság a jellemző eltérés – elsőfokú polinommal szűröm le és normálom középvonalra illetve középsíkra.

4.1.2. A profil és a mikrotopográfiai mérési technika összehasonlítása

Az ipari gyakorlatban jelenleg a vonalmenti érdesség meghatározását preferálják. A mikrotopográfiai mérés napi szintű alkalmazásának elterjedését gátolja egyrészt az a tény, hogy csak javaslatok és „szokások” vannak arra vonatkozóan, hogy mekkora legyen a vizsgált alkatrész felület, másrésztől metszettepintős eljárással egy 1 mm x 1 mm-es felület

mikrotopográfiájának mérése 2 mikronos lépésközzel közel 1 óráig tart, míg a profilmérés mérési hosszától és vontatási sebességtől függően 5-10 másodperc.

A kopás kezdeti szakaszának vizsgálatakor elmondhatjuk, hogy az abráziós szemcsék okozta karcok mélysége több paramétertől függ. Modellkísérleteknél célunk az, hogy a szemcse ne váljon le a felületről és adott vonalon méretétől függően a vizsgálati hosszban végig karcok képződjenek a csúcsonában. Mivel a véges szélességű próbadarabot adott méretszórással rendelkező szemcsékkel karcoljuk, ezért érdemes megvizsgálni, hogy profilméréssel reprezentatív mérési eredményeket kapunk-e elemzéskor vagy pedig mikrotopográfia mérésre van szükségünk.

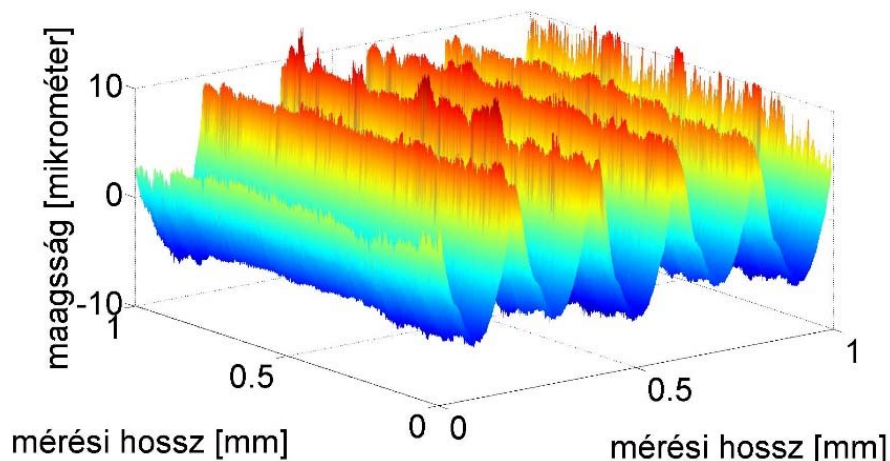
Az előkísérleteket nemesített C45-ös próbadarabon végeztem, melynek tulajdonságait a 3.8. alfejezetben ismertettem.

Az előkísérletnél beállított paraméterek:

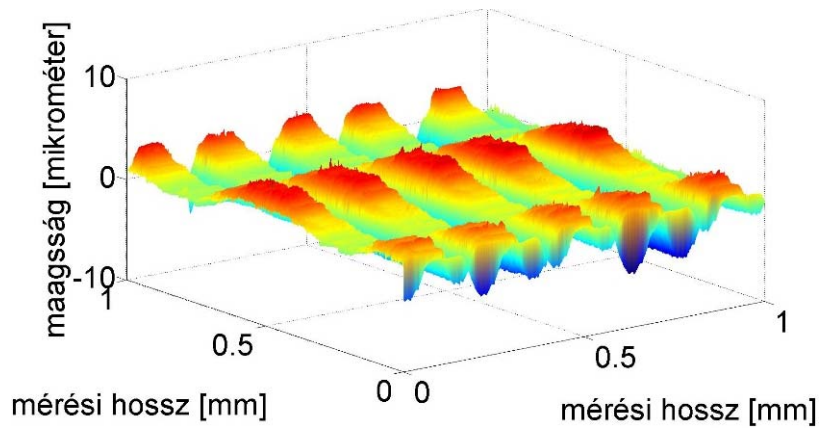
- 3,2 mikrométer átlagos érdességű próbadarab,
- ütökéses megmunkálás,
- 0,2 milliméter fordulatonkénti előtolás,
- száraz súrlódás,
- koptatási sebesség: 25 mm/s,
- koptatási úthossz 15 m,
- felületi normálerő 400 N,
- 600-as,800-as és 1200-as finomságú csiszolópapír,
- pin-on-plate elrendezés,
- 30mm x 30mm elméleti érintkezési felület.

Az érdességmérést Mahr metszettaipintós érdességmérővel végeztem, a darabokon öt sorban és öt oszlopban mértem érdességet a próbadarabon 4 mm hosszban, 0,5 mikrométeres lépésközzel. A mikrotopográfiai méréskor 1mmx1mm-es felület került mérésre 2 mikrométeres lépésközzel mindkét irányban.

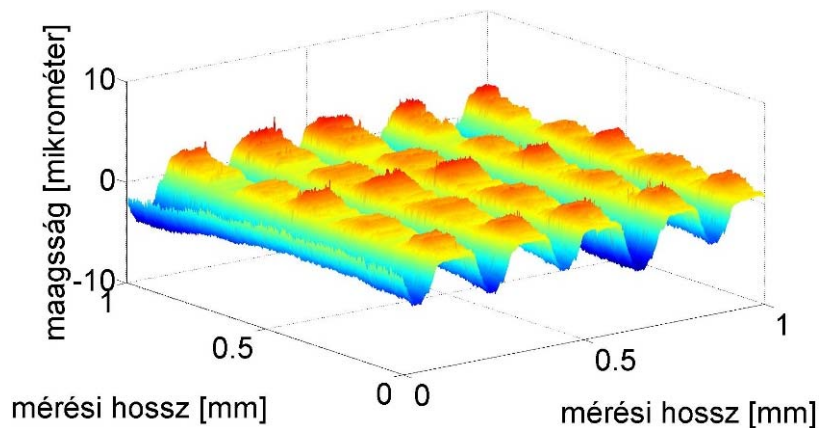
A 51-54. ábrák alapján látható, hogy a kiválasztott előkísérleti paraméterek hatására mindhárom esetben a csúcsona részlegesen megsemmisült.



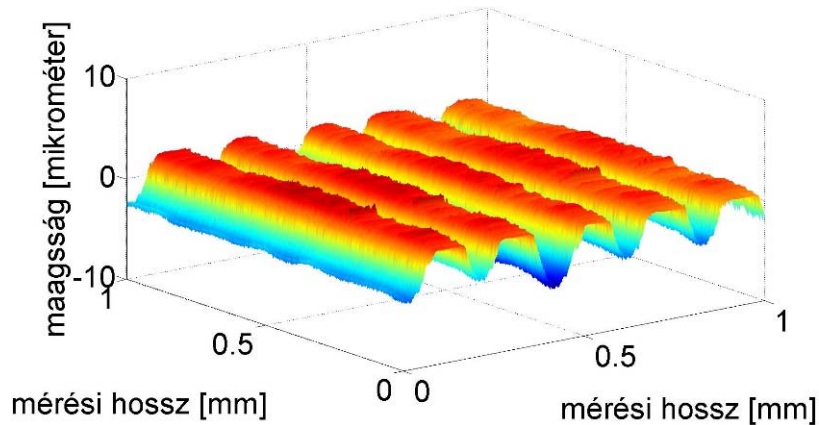
51. ábra Az ütökéses mikrotopográfia



52. ábra A mikrotopográfia 600-as csiszolópapírral történő koptatás után

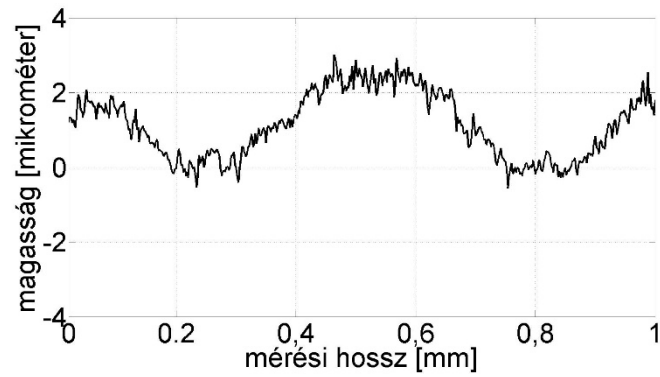


53. ábra A mikrotopográfia 800-as csiszolópapírral történő koptatás után

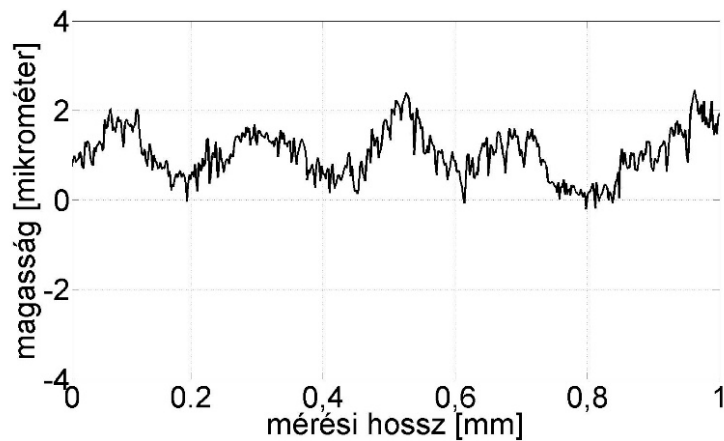


54. ábra A mikrotopográfia 1200-as csiszolópapírral történő koptatás után

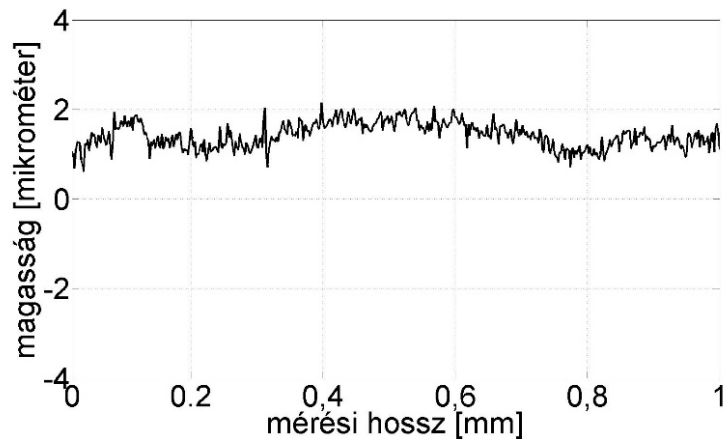
A csúcszóna jellemzésekor elmondhatjuk, hogy a vizsgálati rendszerben az 1200-as finomságú csiszolóvászón abrúziós szemcséi koptatják a leghomogénebben a csúcszónát. Ezt az állítást támasztja alá az 55-57. ábrásor is, melyen a mikrotopográfia csúcszónájának egy-egy érdekességi profilját emeltem ki (előtolás irányára merőleges profil).



55. ábra A mikrotopográfia egyik csúcszónája 600-as csiszolópapírral történő koptatás után



56. ábra A mikrotopográfia egyik csúcszónája 800-as csiszolópapírral történő koptatás után



57. ábra A mikrotopográfia egyik csúcszónája 1200-as csiszolópapírral történő koptatás után

A paraméter szempontú kiértékelésnél az átlagos eltérés, négyzetes eltérés, ferdeség és lapultsági mérőszámokat vizsgáltam, ugyanis ezek a mérőszámok a legszéleskörűben használtak a mérnöki gyakorlatban. A vizsgálatkor a mikrotopográfiai mérést úgy kezeltem, mint egymástól 0,002 mm távolságra végzett 1mm hosszúságú profilmérések. Az egyes mérőszámok átlagát, szórását és variációs együtthatóját a 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat A profilmérés és a mikrotopográfiai mérés összehasonlítása

600-as vászon, profilmérés					600-as vászon, mikrotopográfiából számolt				
	Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]		Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]
Átlag	1.223	1.497	-0.149	3.074	Átlag	1.385	1.596	-0.617	2.244
szórás	0.468	0.405	1.180	1.933	szórás	0.312	0.316	0.207	0.454
CV	38.260	27.081	794.613	62.872	CV	22.521	19.790	33.537	20.252

800-as vászon, profilmérés					800-as vászon, mikrotopográfiából számolt				
	Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]		Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]
Átlag	1.359	1.593	-0.819	2.590	Átlag	1.665	1.882	-0.546	2.060
szórás	0.274	0.252	0.580	1.364	szórás	0.331	0.350	0.281	0.471
CV	20.136	15.806	70.880	52.645	CV	19.897	18.603	51.564	22.878

1200-as vászon, profilmérés					1200-as vászon, mikrotopográfiából számolt				
	Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]		Pa[μm]	Pq[μm]	Psk[-]	Pku[-]
Átlag	1.457	1.652	-0.699	2.189	Átlag	1.608	1.834	-0.707	2.344
szórás	0.100	0.091	0.364	0.499	szórás	0.109	0.128	0.116	0.424
CV	6.834	5.532	52.122	22.777	CV	6.759	6.959	16.432	18.079

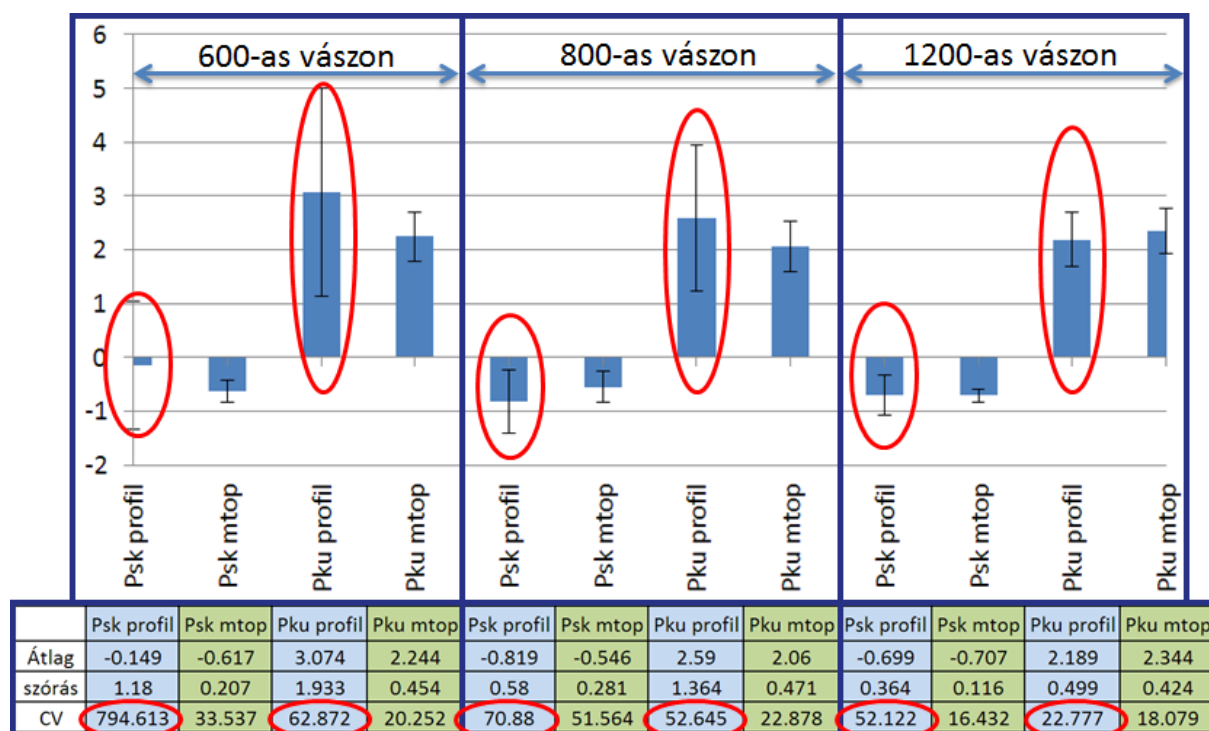
A táblázat adatai alapján elmondható, hogy az érdességmérés pozíciójának megválasztására különböző érzékenységgel válaszolnak a paraméterek.

Az átlagos érdesség esetében elmondható, hogy a szabványos profilmérési hossz és a mikrotopográfián végzett vizsgálatok esetében is a paraméter értéke közel azonos ugyanolyan csiszolóvászon esetén, a CV variációs együttható értéke viszont jelentősen változik a csiszolóvászon finomságának függvényében, ugyanis a 600-as finomságú vászon nem csak a mikrotopográfiák csúcszónáját módosította, hanem egyes helyeken mély karcokat hagyott. A karcok eloszlása és mélysége a csúcszónában hasonló változásokat eredményez a Pq paraméter esetében is.

A statisztikai paraméterek mérési technológiától és csiszolóvászon minőségtől függő értékeit az 58. ábra foglalja össze.

A statisztikai paramétereket vizsgálva elmondható, hogy a 600-as, 800-as és 1200-as csiszolóvászonnál is kisebb variációs együtthatójú értékeket kaptam mikrotopográfiai mérésnél. A legjobb reprodukálhatóságot az 1200-as csiszolópapír szolgáltatja.

A további munkám során az előkísérlet eredményei alapján mikrotopográfiai kiértékelési rendszert választok, ugyanis ennél a kísérletnél jelentkezett a legkevesebb lokális hiba a csúcszónában.

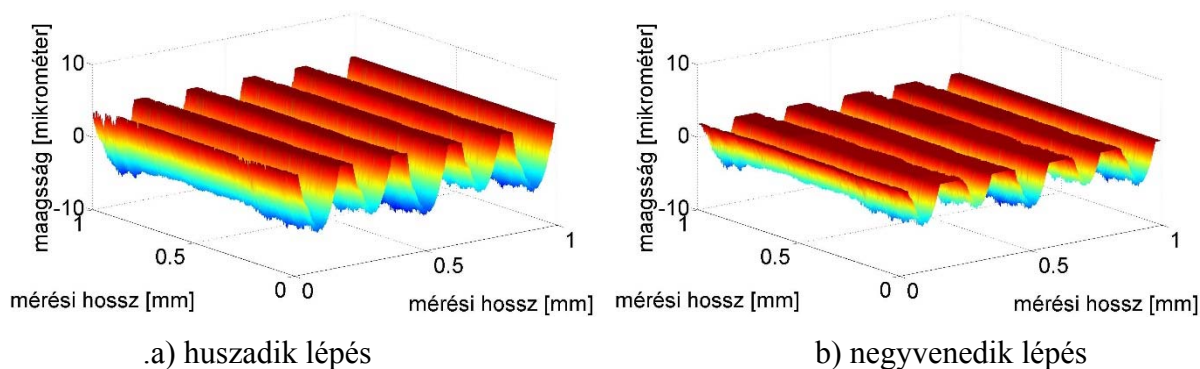


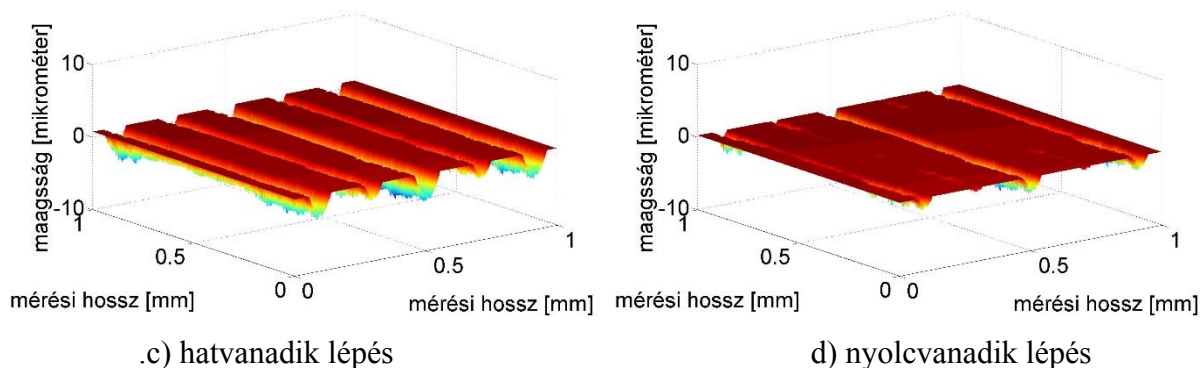
58. ábra A statisztikai paraméterek változása a mérési technika és a csiszolóvászor minőségének függvényében

4.2. A csonkoló algoritmussal kapott eredmények

4.2.1. A síkkal történő foltozás vizsgálata

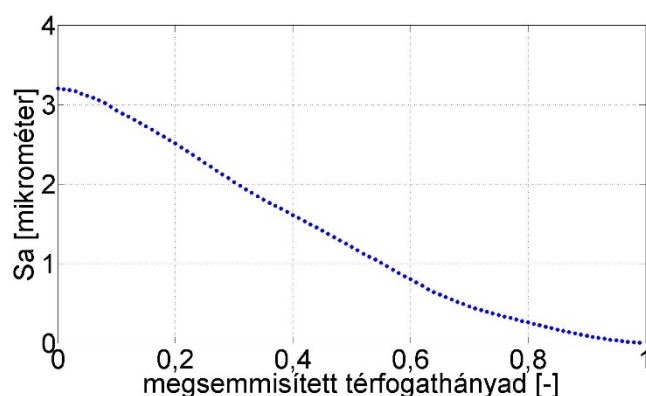
A szimulációs modell Z normálisú síkkal történő foltozása kézenfekvő, amennyiben a szimulációs algoritmus egyszerű megvalósítását alkalmazom. Ez a megvalósítási forma főként akkor célravezető, amikor a gyártott alkatrész átlagos érdessége számottevően nagyobb, mint a kopott alkatrész átlagos érdessége az egyenletes kopás szakaszában. Az algoritmus tesztelésként, valamint a közelítő függvények alakjának meghatározása végett (mivel szakirodalomban erre vonatkozó javaslatot nem találtam) az abrazív karcokat egy síkkal helyettesítettem. A szimulációs modellnél 100 csonkolási magasságot használtam, melynek a huszadik, negyvenedik, hatvanadik és nyolcvanadik lépését a 58. a.-d. ábrákon mutatom be.





59. ábra A szimulációs modell egyes lépéseinek ismertetése

A szimulációs mikrotopográfiákból először az S_a paraméter értékét határoztam meg. Az érdekes paraméter változását a 59. ábrán mutatom be.

59. ábra Az S_a paraméter változása a megsemmisített térfogathányad függvényében

Az ábra alapján elmondható, hogy az S_a paraméter síkkal történő foltozás esetén szigorú monoton csökken, valamint:

- a folyamat elején (0 és 0,1 között) a meredekség csökken,
- a második szakaszban (0,1 és 0,7 között) a meredekség közel állandó,
- a harmadik szakaszban pedig (0,7 és 1 között) csökkenő meredekséggel eléri a 0 mikrométer értéket.

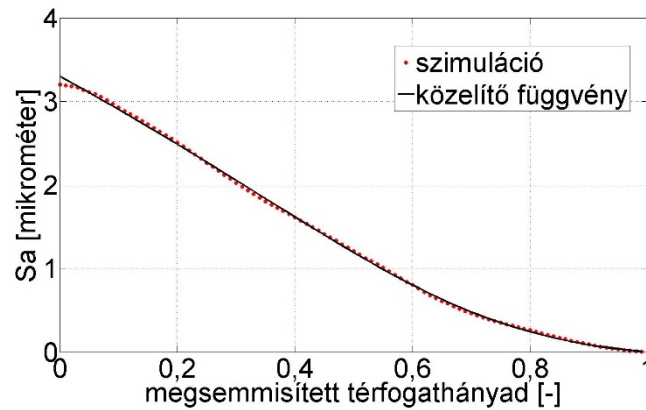
Az így kapott pontthalmaz matematikai közelítéséhez logisztikus függvényt alkalmaztam, melynek matematikai alakját a (21) egyenlet definiálja:

$$f\left(\frac{\Delta V}{V}\right) = \frac{\left(a \frac{\Delta V}{V} + b\right)}{1 + e^{\frac{c \frac{\Delta V}{V} + d}{V}}} + g. \quad (21)$$

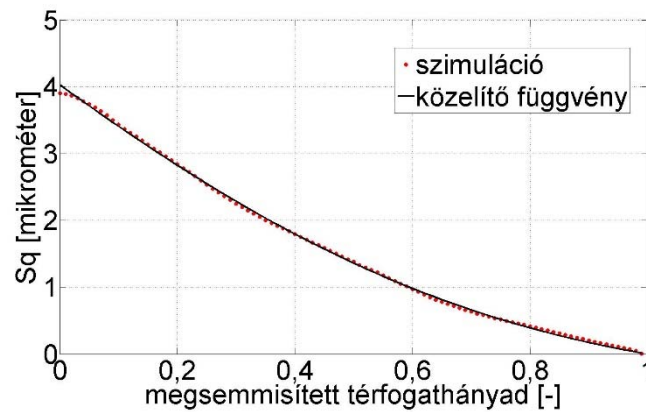
Az S_a és az S_q paraméterek mivel teljes megsemmisülés esetén a nulla értéket veszik fel $x=1$ értéknél (ez a lineáris kopási szakasz első pontja), így a közelítő függvény egyenlete a (22) egyenletté egyszerűsödik:

$$f\left(\frac{\Delta V}{V}\right) = \frac{\left(a \frac{\Delta V}{V} - a\right)}{1 + e^{\frac{c \frac{\Delta V}{V} + d}{V}}}. \quad (22)$$

Az S_a és a hasonló alakot felvevő S_q paraméterek függvényközelítése (60. és 61. ábra), valamint az egyenlet egyes paraméterei és azok mértékegységei, (8. táblázat) az alábbiak szerint alakulnak (amennyiben az S_a és S_q mértékegységét mikrométerben szeretnénk meghatározni):



60. ábra Az Sa paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése

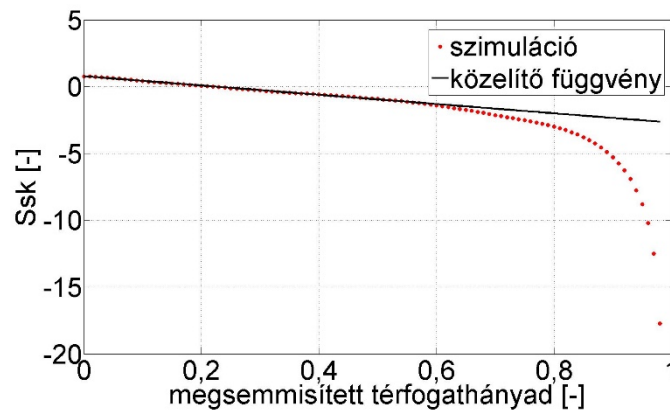


61. ábra Az Sq paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése

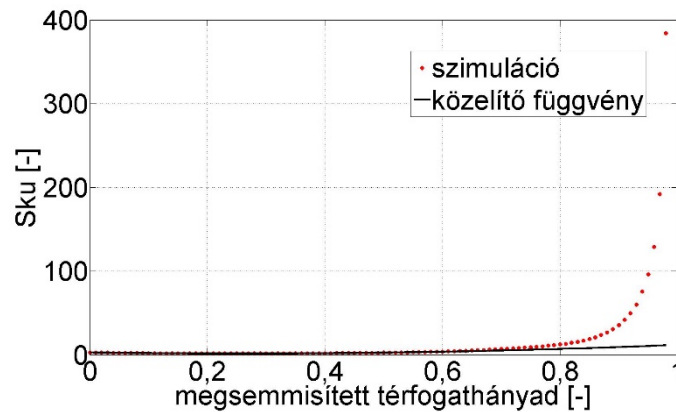
8. táblázat A függvényközelítés eredménye

Paraméter	a [μm]	b [μm]	c [-]	d [-]	g [μm]	R ²
Sa [mikrométer]	-3,437	-	4,765	-3,193	-	0,9995
Sq [mikrométer]	-5,898	-	1,846	-0,7662	-	0,999

A statisztikai paraméterek szimulációs eredményét a 62. és 63. ábra mutatja be.



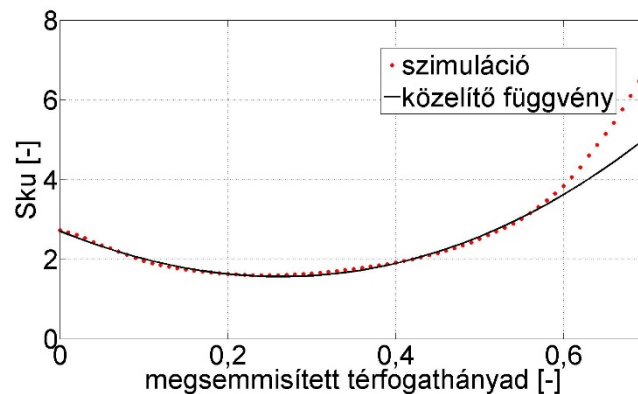
62. ábra Az Ssk paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése



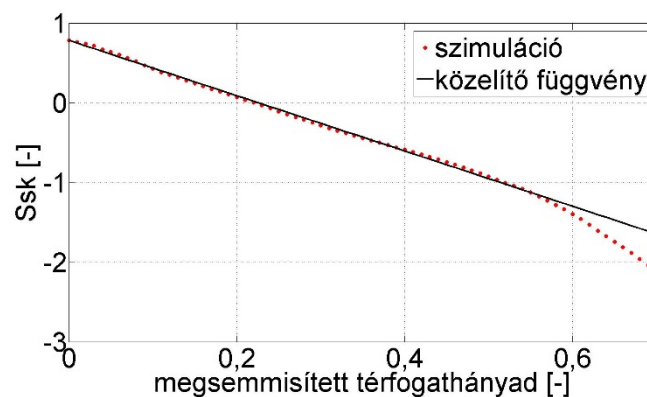
63. ábra Az Sku paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése

A 62. és 63. ábrán láthatjuk, hogy a matematikai közelítő eljárás a mikrotopográfia teljes megsemmisülésének közelében nem jellemzi elvárható pontossággal a szimulációs eredményeket. Ez a hiba a megközelítésben keresendő.

A mikrotopográfia teljes megsemmisülésekor az S_a és az S_q is zérus értéket vesz fel, azaz $Z=0$ síkot kapunk eredményül. Ekkor a S_{sk} paraméter mínusz végtelenhez, az S_{ku} plusz végtelenhez tart az általam vizsgált mikrotopográfia esetén. A szimulációs értékekről elmondható továbbá, hogy a topológiai térkép (Whitehouse, 1994) alapján a lapultsági mérőszám értéke gyártáskor 0 és 10 közötti, a ferdeségi pedig -2 és 1 között változik. A függvényközelítés tartományát így ennél a szimulációs algoritmusnál 0 és 0,6 megsemmisített térfogatértékek közti értékekre módosítottam. A módosított tartományokat a ferdeségi mérőszámmal a (21) egyenlet szerinti alakkal, a lapultsági mérőszámmal pedig elsőfokú $f(x)=ax+b$ alakkal közelítettem. A függvényközelítéseket és az logisztikus függvények paramétereit és azok mértékegységeit a 64. és 65. ábrák, valamint a 9. táblázat foglalja össze.



64. ábra Az Sku paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése



65. ábra Az Ssk paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése

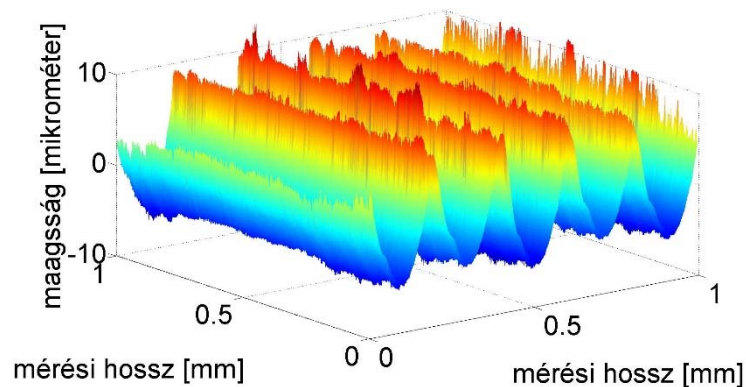
9. táblázat A függvényközelítés eredménye

Paraméter	a [-]	b [-]	c [-]	d [-]	g [-]	R ²
Sku [-]	-49,91	-414,5	0.8079	-1,991	367,4	0,9919
Ssk [-]	-3,471	0,7813	-	-	-	0.9983

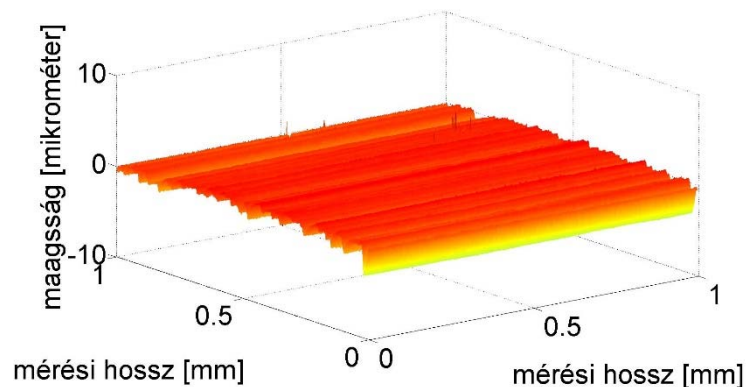
Összefoglalva elmondható a 4.2.1. fejezet alapján, hogy a szimulációs modell az Sa és Sq érdességi paraméterek segítségével a folyamatos csúcszóna megsemmisülést a közelítő függvény alakjával jellemezhető, de az abrúziós karcok hatását nem veszi figyelembe. Ez a hiányosság a statisztikai paraméterek vizsgálatokor hangsúlyosan előtérve kerül, azaz ebben a formában a fejlesztett modell nem képes a választott paraméterek szempontjából teljes, valamint a gyakorlati élet szempontjából használható eredményeket szolgáltatni. A modell továbbfejlesztését a 4.2.2. fejezet ismerteti.

4.2.2. Abrúziósan koptatott mikrotopográfiával történő foltozás vizsgálata

Az alfejezetben a szimulációs modellnél bementként a 3. fejezetben ismertetett ütökéses mikrotopográfiát és egy 1200-as finomságú csiszolóvászonnal teljes mértékben megsemmisített mikrotopográfiát alkalmaztam. A bemenetet és azok tulajdonságait a 66. és 67. ábrák, valamint a 10. táblázat ismerteti.



66. ábra Az ütökéses mikrotopográfia

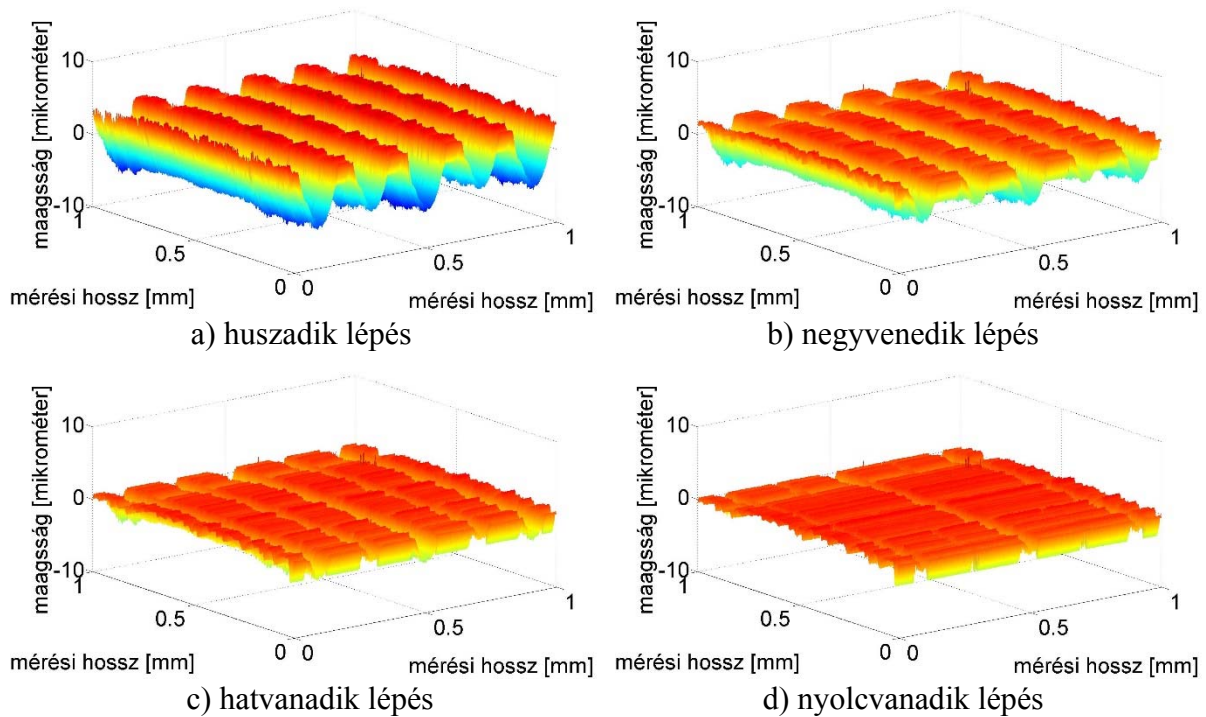


67. ábra A csiszolópapír által definiált mikrotopográfia a lineáris kopás szakaszában

10. táblázat A gyártott mikrotopográfia érdességi paramétereit

paraméter	Sa [mikrométer]	Sq [mikrométer]	Ssk [-]	Sku [-]
ütőkéses	3,222	3,9244	0,7599	2,7376
koptatott	0,4294	0,5928	-2,1505	14,9583

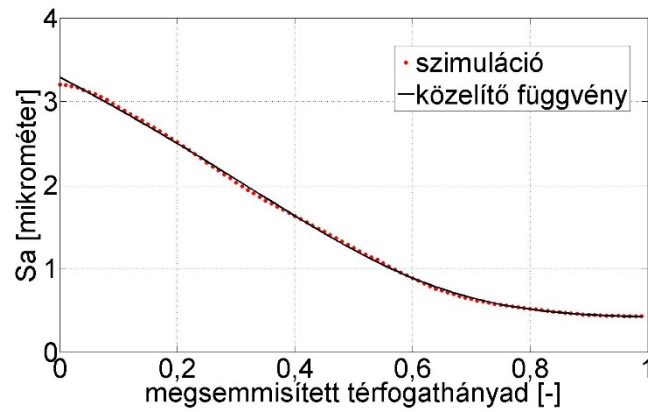
Az analízis során 100 csonkolási magasságot használtam, melynek a huszadik, negyvenedik, hatvanadik és nyolcvanadik lépését a 68. a.-d. ábrákon mutatom be



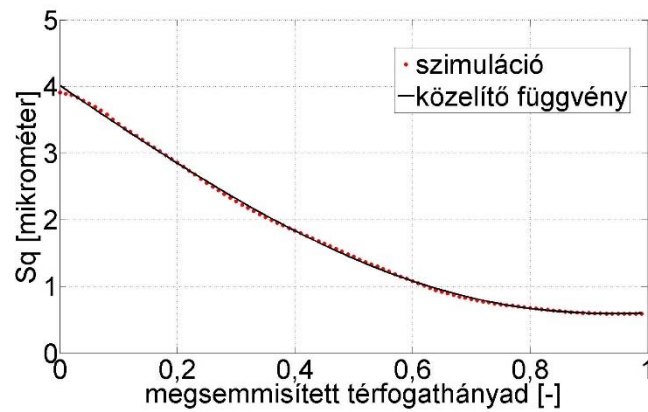
68. ábra A szimulációs modell egyes lépéseinek ismertetése

A 68. ábra eredményeinek alapján elmondható, hogy az algoritmus által generált mikrotopográfiák hatvanadik és nyolcvanadik lépése között az ütőkéses mikrotopográfiai jellemzők nagymértékben háttérbe szorúlnak és a felületen a domináns jellemzőket az abrázációs karcok adják. Ezt a jellemző váltási pontot valós mérési jeleknél pontosan megadni nehézkes, ugyanis azt a gyártáskor fellépő hullámossági profil völgyzónája és az érdességi profil völgyzónájában található kiszakadások definiálják. A közelítő meghatározás eredményei alátámasztják a 4.2.1. fejezetben alkalmazott 70%-os megsemmisülésig alkalmazott csonkolási hányadig alkalmazott függvényközelítést.

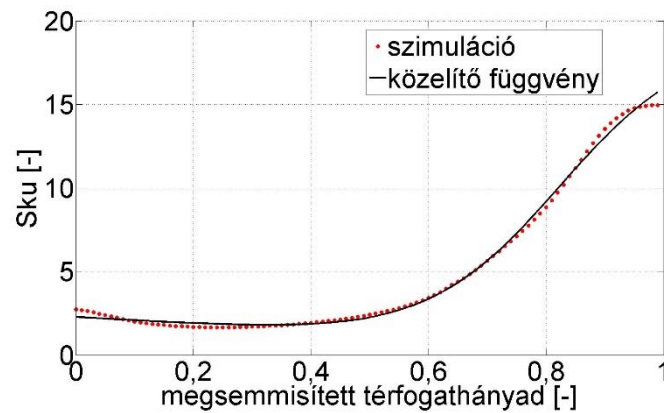
Az egyes közelítő függvények paramétereinek meghatározásakor a 4.2.1. fejezetben kiválasztott függvényeket alkalmaztam. Az algoritmus által szolgáltatott érdességi paraméterek változását, valamint a közelítő függvények paramétereit foglalják össze a 69.-72. ábrák és a 11. táblázat.



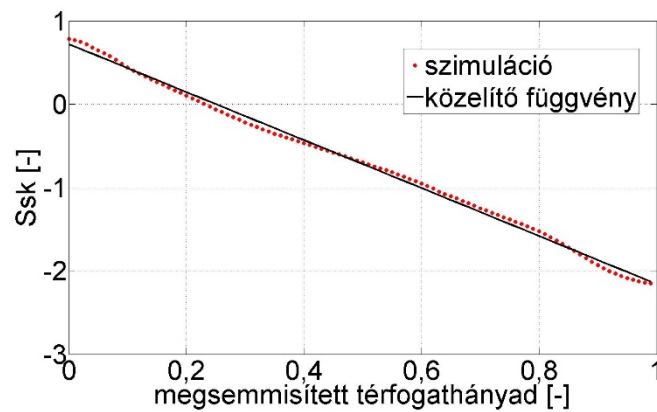
69. ábra Az Sa paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése



70. ábra Az Sq paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése



71. ábra Az Sku paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése



72. ábra Az Ssk paraméter szimulációs eredményei és függvényközelítése

11. táblázat A függvényközelítés paramétereinek értékei

Paraméter	a	b	c	d	g	R ²
Sa [mikrométer]	-3,271	2,954	5,827	-3,273	0,444	0,9995
Sq [mikrométer]	-6,086	2,176	2,875	-2,321	2,031	0.9995
Sku [-]	-2,137	-16,88	8,75	-7,144	19,14	0,9973
Ssk [-]	-2,879	0,7201	-	-	-	0.996

A kétfajta csonkoló algoritmus eredményeiről elmondhatjuk, hogy az átlagos egyenetlenség (Sa), az eltérések mértani átlaga (Sq) és a ferdeségi mérőszám (Ssk) paramétere mindkét modellnél ugyanazzal az alkalmazott függvénnyel 0,99-nál nagyobb determinációs együttható értékkel leírhatók, nagyságrendi különbség nincs az egyes értékek között.

A lapultsági mérőszám (Sku) leírásakor az egyes paraméterek nagyságrendileg is különböznek (kivéve „d” paramétert, ahol a változás körülbelül 3,5-szeres), így a csonkoló algoritmusnál a fizikai folyamatot jobban jellemző abráziós karcok figyelembevételére szükség van.

4.3. Az abráziós kísérletek eredményei

4.3.1. Az érdességmérés kiértékelése Descartes térben

A szimulációs algoritmus eredményei alapján a szakirodalomban ajánlott kísérletterv típust nem találtam a kopási szakasz kezdetének leírására, így teljes faktoros kísérlettervet készítettem. A kísérletterv során:

- a felületeket összeszorító erőt 200 N és 600 N között 100 N lépésközzel módosítottam,
- a távolságot 600 mm és 4800 mm között 600 mm-enként, majd
- 4800 mm és 10800 mm addig, míg legalább két egymás melletti ütökéses völgyzóna teljesen el nem tűnik 1200 mm-enként változtattam,
- száraz súrlódást alkalmaztam.

A mérések végrehajtásakor szakaszos mérési eljárást használtam. A méréseket az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar Anyag- és Gyártástudományi Intézetének Műszerfejlesztő, Microtopográfiai és Anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem.

A mérés lépései az alábbiak voltak:

- próbadarab vegyszeres tisztítása és megszáritása,
- csiszolópapír vegyszeres tisztítása és megszáritása,
- kopási kísérlet elvégzése,
- próbadarab vegyszeres tisztítása és megszáritása,
- fémmikroszkópos kép készítése NEOPHOT 2 fémmikroszkóppal,
- mikrotopográfiai mérés.

Minden egyes erőértékhez más gyártott próbadarabot használtam. A mérések szobahőmérsékleten, normál páratartalom mellett készültek.

Minden nap a hőmérséklet, páratartalom és az egyéb előre nem várt hatások miatt az alkalmazott műszerek kalibrálását etalon segítségével ellenőriztem.

Az érdességmérés feldolgozásakor egyrészt a gyártó által szolgáltatott Marsurf XT 4.00-11.1 szoftvert, az Óbudai Egyetem tulajdonában lévő Surface programot és saját fejlesztésű szoftvereket és jelfeldolgozó algoritmusokat használtam.

A kiértékeléskor a 4.2. fejezetben ismertetett algoritmus által megadott paramétereket határoztam meg.

A paraméterek meghatározásához – mivel két változótól, az erőből és a koptatási úthossztól is függ – a (21) egyenletet háromdimenzióssá terjesztettem ki. A kiterjesztés matematikailag többféleképpen történhet, melyek közül a kiválasztott alakot a (23) egyenlet szemlélteti.

$$f(x, y) = \frac{(ax + b)}{1 + e^{(cy+d)}} + \frac{(hy + k)}{1 + e^{(lx+m)}} + n \quad (23)$$

Az egyenlet alakja az erő, út, érdességi paraméterben a (24) egyenlet szerint használtam függvényközelítéskor:

$$S = \frac{\left(\frac{a \cdot F}{1000} + b\right)}{1 + e^{\left(\frac{c \cdot s}{1000} + d\right)}} + \frac{\left(\frac{h \cdot s}{1000} + k\right)}{1 + e^{\left(\frac{l \cdot F}{1000} + m\right)}} + \text{const.} \quad (24)$$

Az egyenletbe, ha az erő (F) értéke [N]-ban, az út (s) [mm]-ben kerül behelyettesítésre, akkor az amplitúdótól függő érdességi paraméterek mértékegysége mikrométer, a statisztikai paraméterek pedig dimenzió nélküliek. A (23) egyenlet konstans értéke a függvényközelítéskor alkalmazott z tengely irányú eltolást definiálja, értéke a teljesen megsemmisült mikrotopográfia értékével megegyező.

A csonkoló algoritmus Ssk paraméterének függvénnyel közelítéskor elsőfokú polinomot alkalmaztam. Ennek a kiterjesztése három dimenzióba nem lehetséges, mivel nincs olyan sík egyenlet, amely bármely erőnél és nulla elmozdulásnál, valamint bármely elmozdulásnál és nulla erőnél ugyanazt az értéket veszi fel és nullától különböző meredekséggel rendelkezik nem nulla erőnél és nem nulla elmozdulásnál. A háromdimenziós függvényközelítéshez így nem elsőfokú polinomokat alkalmazok Ssk paraméterének közelítéskor, hanem a (24) egyenlet alakjában keresem a megoldást.

Az egyes érdességi jellemzők mérési eredményeit foglalják össze a 12-15. táblázatok az erő és a koptatási úthossz függvényében.

12. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott átlagos érdesség értékei [μm]

erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	3,222	3,222	3,222	3,222	3,222	3,222
600	3,222	3,152	2,726	2,542	2,309	2,137
1200	3,222	2,731	2,519	2,226	2,077	1,92
1800	3,222	2,52	2,171	1,858	1,713	1,659
2400	3,222	2,3	1,67	1,461	1,37	1,1
3000	3,222	2,107	1,524	1,181	1,333	0,845
3600	3,222	1,901	1,371	1,243	1,004	0,764
4200	3,222	1,696	1,495	0,982	0,833	0,593
4800	3,222	1,984	1,515	0,933	0,842	0,528
6000	3,222	1,828	1,159	0,82	0,837	0,342
7200	3,222	1,287	1,073	0,806	0,373	0,253
8400	3,222	1,218	0,71	0,697	0,16	0,227
9600	3,222	1,249	0,772	0,605	0,283	0,109
10800	3,222	1,104	0,528	0,515	0,235	0,197

13. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott eltérések mértani átlagának értékei [μm]

erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	3,9244	3,9244	3,9244	3,9244	3,9244	3,9244
600	3,9244	3,651	3,138	2,897	2,622	2,402
1200	3,9244	3,135	2,846	2,501	2,316	2,144
1800	3,9244	2,848	2,414	2,063	1,898	1,843
2400	3,9244	2,571	1,862	1,618	1,535	1,31
3000	3,9244	2,358	1,698	1,347	1,532	1,028
3600	3,9244	2,137	1,571	1,414	1,164	0,948
4200	3,9244	1,893	1,691	1,161	1,049	0,776
4800	3,9244	2,258	1,684	1,114	1,033	0,728
6000	3,9244	2,04	1,324	0,969	1,233	0,475
7200	3,9244	1,449	1,255	1,001	0,554	0,328
8400	3,9244	1,463	0,886	0,921	0,225	0,336
9600	3,9244	1,409	0,921	0,869	0,422	0,142
10800	3,9244	1,321	0,684	0,672	0,334	0,248

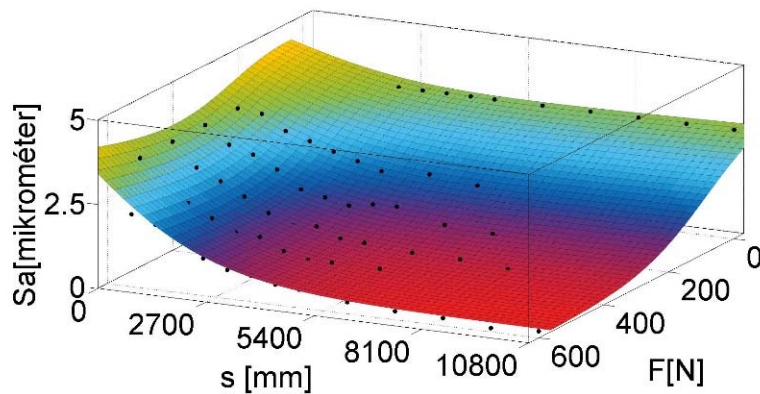
14. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott lapultsági mérőszámok értékei [-]

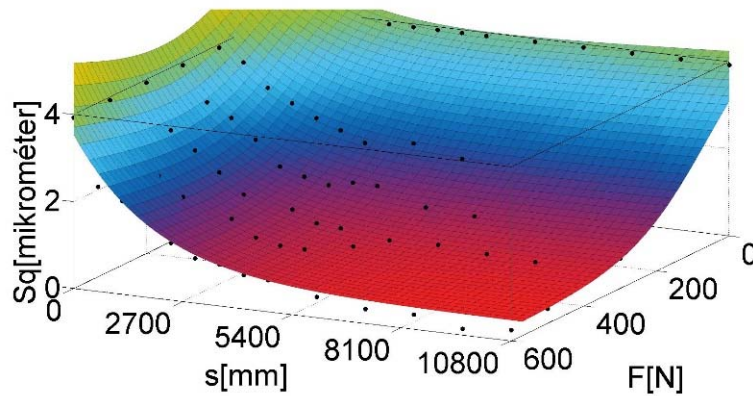
erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	2,7376	2,7376	2,7376	2,7376	2,7376	2,7376
600	2,7376	1,824	1,858	1,708	1,804	1,662
1200	2,7376	1,764	1,627	1,61	1,621	1,661
1800	2,7376	1,597	1,624	1,601	1,69	1,708
2400	2,7376	1,554	1,702	1,81	2,017	2,692
3000	2,7376	1,647	1,801	2,157	2,245	2,988
3600	2,7376	1,882	2,17	1,977	2,352	3,676
4200	2,7376	1,744	2,075	2,742	3,815	3,988
4800	2,7376	1,93	1,785	2,65	3,03	5,495
6000	2,7376	1,735	2,253	2,862	7,915	6,029
7200	2,7376	2,164	2,584	3,73	7,519	7,0563
8400	2,7376	3,083	3,694	4,346	7,705	8,76
9600	2,7376	2,134	2,775	6,676	8,177	8,9763
10800	2,7376	2,675	3,72	4,772	8,234	12,6496

15. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott ferdeségi mérőszámok értékei [-]

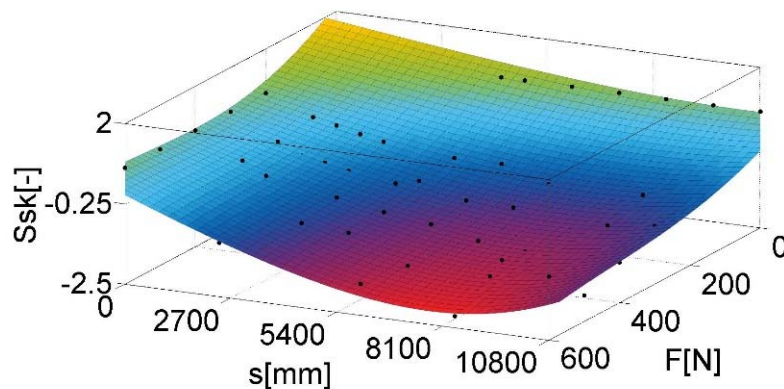
erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	0,7599	0,7599	0,7599	0,7599	0,7599	0,7599
600	0,7599	0,247	0,011	0,0457	-0,13	-0,075
1200	0,7599	0,257	0,097	0,09	-0,179	-0,35
1800	0,7599	0,113	-0,202	-0,252	-0,435	-0,47
2400	0,7599	-0,047	-0,318	-0,558	-0,658	-0,99
3000	0,7599	-0,168	-0,462	-0,693	-0,76	-1,028
3600	0,7599	-0,455	-0,729	-0,597	-0,786	-1,206
4200	0,7599	-0,442	-0,639	-0,975	-1,208	-1,336
4800	0,7599	-0,364	-0,482	-0,831	-0,892	-1,578
6000	0,7599	-0,354	-0,852	-0,995	-2,203	-1,62
7200	0,7599	-0,757	-0,879	-1,289	-1,997	-0,939
8400	0,7599	-1,103	-1,306	-1,415	-1,581	-2,174
9600	0,7599	-0,702	-1,03	-1,993	-2,181	-0,431
10800	0,7599	-0,88	-0,869	-1,3677	-1,77	-0,715

Az egyes érdességi paraméterekhez tartozó függvényközelítéseket és a (24) egyenlet paramétereit és azok mértékegységét a 73.-76. ábrák és a 16. táblázat foglalja össze, amennyiben az S_a és S_q értékét mikrométerben határozzuk meg.

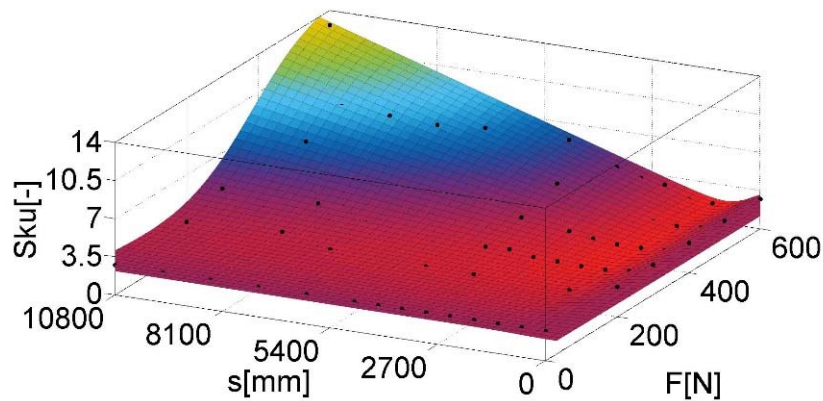
73. ábra Az S_a paraméter függvényközelítése statisztikai módszerrel



74. ábra Az Sq paraméter függvényközelítése statisztikai módszerrel



75. ábra Az Ssk paraméter függvényközelítése statisztikai módszerrel



76. ábra Az Sku paraméter függvényközelítése statisztikai módszerrel

16. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott paraméterek értékei

	a [$\mu\text{m}/\text{N}$]	b [μm]	c [$1/\text{mm}$]	d [-]	h [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	k [μm]	l [$1/\text{N}$]	m [-]	R^2
Sa [μm]	7,375	2,601	0,6106	0,3725	0,03795	2,875	10,02	-1,516	0,9397
Sq [μm]	72,5	31,81	0,5326	3,044	0,06937	3,524	10,01	-1,224	0,9465
	a [$1/\text{N}$]	b [-]	c [$1/\text{mm}$]	d [-]	h [$1/\text{mm}$]	k [-]	l [$1/\text{N}$]	m [-]	R^2
Ssk [-]	-19,42	-3,657	0,3096	-4,58	-0,7837	27,58	-2,853	1,359	0,852
Sku [-]	-6,063	-0,0491	-3,14	1,418	1,286	0,8471	-10,8	4,791	0,9398

A méréseim alapján elmondható, hogy az alkalmazott megmunkált felületnél, erőknél, úthosszaknál, csiszolóanyagánál és kenési állapotnál az átlagos egyenetlenség és az eltérések mértani átlaga függvények monoton csökkenő jelleget mutatnak. Ennek az az oka, hogy a kopás kezdeti szakaszában az abrázációs közeg csak a csúcsonát módosította, a levált szemcsék nem érdesítették fel a C45-ös anyag felületét. Az eredményekről elmondható továbbá, hogy a vizsgált kísérlettér határainak megválasztása megfelelő volt a csonkoló algoritmus eredményeinek validálására, ugyanis az alkalmazott függvényközelítést 93%-nál nagyobb determinációs együtthatóval sikerült megvalósítani.

A statisztikai paraméterek változása a modellkísérletben is hasonló trendet követ, mint az algoritmusnál. A Sku értéke a koptatási kísérlet végén meredek növekedésbe kezd. Ez a növekedés annak köszönhető, hogy az orientációval rendelkező mikrotopográfia jellege egyre kevésbé domináns az abrázációs karcok miatt. Kopásdiagnosztikai szempontból elmondható, hogy az Sku paraméter ugrásszerű változása előrejelzi a kezdeti kopás szakaszának a végét.

4.3.2. Az érdességmérés kiértékelése hullámhossz térben

A kísérletterv eredményeinek mérését hullámhossz térbe történő transzformációval is elvégeztem. A szakirodalom alapján elmondható, hogy négy elterjedt módszer van a hullámhossztérbeli analízisre és kiértékelésre:

- magasságkülönbség korreláció,
- autokorreláció,
- PSD analízis,
- fraktáldimenzió analízis.

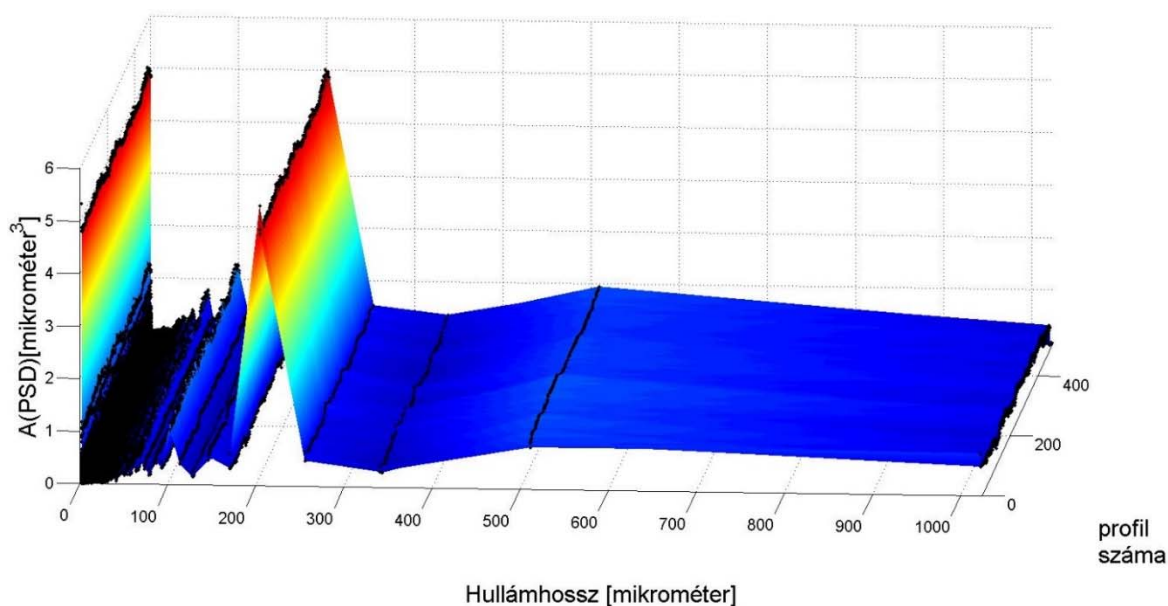
Több cikkemben foglalkoztam a módszerek használhatóságával, keresve a megfelelő technikát a hullámhossz összetevők jellemzésére. Összefoglalva elmondható, hogy a fraktáldimenzió analízis segítségével nem sikerült műszakilag megfelelő jellemzést adnom sem megmunkált, sem pedig abrázációs felületek esetében. A fraktáldimenzió – melynek értéke profilméréskor 1 és 2 közé, mikrotopográfiai méréskor 2 és 3 közé esik – a logaritmus függvény szerinti spektrum ábrázolás miatt a domináns hullámhossz alatti jelek részletes jellemzését segíti elő.

A korrelációs függvények alkalmazhatósága a szakirodalmat tekintve sok esetben más tudományágakban megfelelő módszernek látszik, de a felület minősítéskor már a domináns hullámhosszt (orientált mikrotopográfiaik esetében az előtolás értékét) is szubjektív leolvasási hibával adja meg.

Munkám során ezért a PSD analízist alkalmaztam. A PSD analízis során Fourier transzformáció segítségével adott egymástól diszkrét távolságra elhelyezkedő hullámhosszúságú jelekkel történő gerjesztéssel vizsgáljuk a bemeneti függvény érzékenységét.

Ez a technika már napjaink kiértékelő rendszereiben is megtalálható modulként (domináns hullámhossz modul), de egy teljes jel PSD analízise még nem hozzáférhető kereskedelmi forgalomban. Az elterjedését véleményem szerint az gátolja, hogy a Persson modell által használt háromdimenziós PSD analízis mindkét irányban gerjeszti a mikrotopográfiát és figyelni a válaszfüggvényeket, így a mikrotopográfia analízis nem adja meg az egyes frekvencia összetevőket.

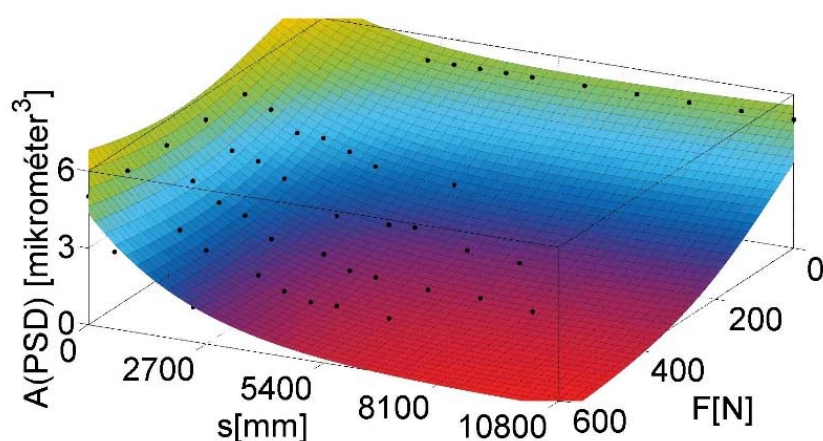
Munkám során ezért a vonalmenti spektrum analízist úgy terjesztettem ki három dimenzióra, hogy az orientált mikrotopográfiát előtolás irányra merőlegesen profilokra bontottam és így készítettem el minden profilnak a spektrum függvényét, majd ezeket a függvényeket profilonként rendezve „felületet” építettem belőle. Az eljárás eredményét a kísérletterv megvalósításakor használt mikrotopográfiára a 77. ábra mutatja be (a további jelfeldolgozás könnyítése miatt az amplitúdókat ábrázolásakor a hullámhosszra merőleges síkra vetítettem).



77. ábra Az PSD amplitúdók profilonkénti ábrázolása

A 77. ábrán láthatjuk, hogy a profilok egy domináns hullámhosszal rendelkeznek 204 mikronos hullámhossznál (az ütökéses megmunkálásnál a fogankénti előtolás 200 mikrométer volt). Az ábrán a kisebb hullámhosszúságú jelek az érdességi jellemzőket, a nagyobb hullámhosszúságúak pedig a hullámossági jellemzőket tartalmazzák. Az ábra alapján megfigyelhetjük, hogy a kisebb hullámhosszaknál több a mintavételezési hullámhossz, így esetünkben az domináns hullámhossz és a kisebb hullámhosszúságú összetevők jellemzésére nyílik lehetőségünk. A nagyobb hullámhosszaknál a Shannon mintavételezési törvény miatt nem tudunk konkrét és pontos információkat megfogalmazni. Esetünkben, például hogyha van egy 800 mikrométeres jelösszetevőnk, akkor azt más hullámhosszak kompozíciójaként definiálja a PSD analízis.

Az előtoláshoz tartozó hullámhosszak amplitúdójának a koptató kísérlet közbeni változását és variációs együtthatóit foglalják össze a 17. és 18. táblázatok, valamint a 78. és 79. ábrák.



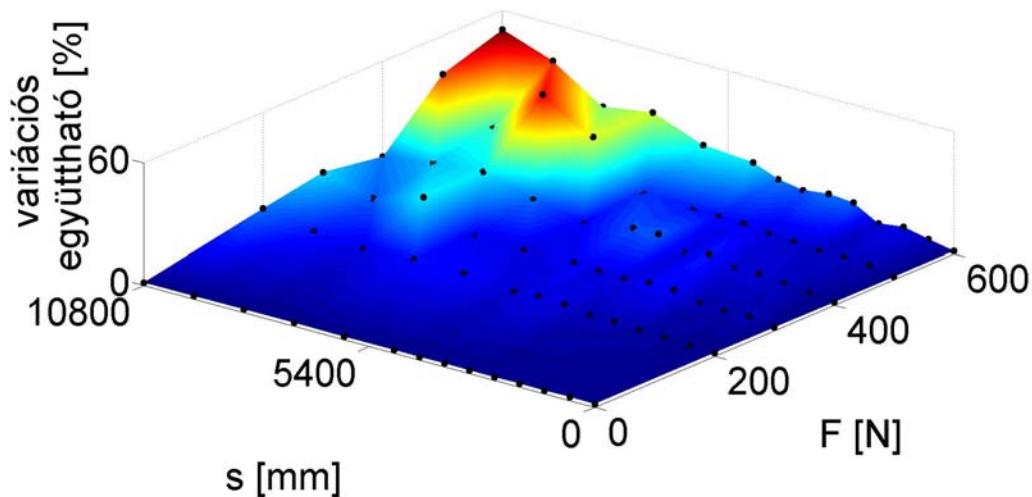
78. ábra Az PSD amplitúdók változása

17. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott előtolási hullámhosszhoz tartozó amplitúdók értékeinek átlaga [μm^3].

erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	5,01797	5,01797	5,01797	5,01797	5,01797	5,01797
600	5,01797	4,59	3,9771	3,793	3,15	3,0126
1200	5,01797	3,8316	3,726	3,119	3,033	2,74
1800	5,01797	3,806	3,2155	2,771	2,4081	2,4065
2400	5,01797	3,44	2,3318	2,0159	1,7986	1,3556
3000	5,01797	3,03	2,0884	1,6158	1,7692	1,095
3600	5,01797	2,6296	1,71	1,759	1,3026	0,9454
4200	5,01797	2,396	2,077	1,2757	1,0441	0,656
4800	5,01797	2,807	2,128	1,1821	1,0615	0,6325
6000	5,01797	2,219	1,5707	1,0272	0,91	0,3437
7200	5,01797	1,7975	1,4088	1,0271	0,3026	0,0826
8400	5,01797	1,5957	0,8973	0,8366	0,075	0,2034
9600	5,01797	1,5848	0,9692	0,6137	0,2658	0,0366
10800	5,01797	1,2901	0,5381	0,4509	0,1061	0,036

18. táblázat A kísérletterv alapján meghatározott előtolási hullámhosszhoz tartozó amplitúdók értékeinek variációs együtthatói [%].

erő [N] \ út [mm]	0	200	300	400	500	600
0	1,54693	1,54693	1,54693	1,54693	1,54693	1,54693
600	1,54693	1,5817	3,54781	2,50461	3,46984	3,92352
1200	1,54693	2,54202	3,073	4,15197	4,35542	6,5073
1800	1,54693	2,87704	3,30586	5,26886	3,88688	4,89923
2400	1,54693	3,34302	7,00746	5,04489	5,13733	11,8029
3000	1,54693	3,39604	6,84256	8,31786	5,55053	12,7306
3600	1,54693	5,39246	5,49708	5,34963	7,14724	11,2968
4200	1,54693	6,02254	5,92682	11,5231	7,58548	13,2165
4800	1,54693	5,04809	6,65883	11,0651	8,12058	18,2292
6000	1,54693	7,45381	5,76813	7,05802	9,61538	20,3375
7200	1,54693	7,79972	6,67944	12,511	30,0066	29,4431
8400	1,54693	6,03497	18,7228	18,7306	44,4	25,762
9600	1,54693	8,23448	11,6591	16,4901	22,31	41,8033
10800	1,54693	12,5959	17,822	13,1293	40,9991	50,53



79. ábra Az PSD variációs együtthatóinak változása koptatási úthossz és az erő függvényében

A kopási folyamat során növekvő erő és útértékek hatására elmondhatjuk, hogy az előtolási hullámhossz által definiált hullámhossz amplitúdója szigorú monoton csökken, valamint a meghatározásukkor számolható variációs együttható értéke az eredeti mikrotopográfia megsemmisülésekor ugrásszerűen megnő.

4.4. Új tudományos eredmények

Kutatómunkám során a kidolgozott csonkoló algoritmus és az elvégzett kísérletek segítségével az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg:

1. A szimulációs algoritmus eredményei abrázíósan koptatott mikrotopográfiával történő foltozás esetén

Szimulációs modellt dolgoztam ki, mely lehetővé teszi tetszőleges sík megmunkálású felület mikrotopográfiai változásának vizsgálatát abrázíós körülmények között a kopás kezdeti szakaszában. Az algoritmus az azonos méretű és lépésközű megmunkált és kopott mikrotopográfia, valamint a lépésszám segítségével – lépésenként állandó térfogateltávolítást alkalmazva – kapcsolatot teremt a csonkoláskor eltávolított anyagmennyiség és az érdességi paraméterek között, figyelembe véve a csúcsonában található abrázíós karcok befolyásoló hatását.

2. A profil és a mikrotopográfiai mérési technika alkalmazhatóságának vizsgálata abrázíósan koptatott felületek esetén

Abrázíósan koptatott felületek esetében profilmérésekkel és mikrotopográfiai mérésekkel igazoltam, hogy az alkalmazott abrázíós szemcseszerkezet (600-as, 800-as és 1200-as finomságú csiszolóváson) és az érdességmérési technológia (profil vagy mikrotopográfiai mérés) befolyásolja az általam használt felületi minőséget leíró paraméterek variációs együtthatójának értékét.

Méréseimmel megállapítottam, hogy az amplitúdótól függő paraméterek közül az átlagos egyenetlenség és az eltérések mértani átlaga paraméterek kisebb variációs együtthatóval rendelkeznek, mint ferdeségi és lapultsági paraméterek, valamint a mikrotopográfiai mérés erősebb korrelációval jellemzi a kiválasztott paraméterek segítségével a kopási folyamatot, mint a vonal menti érdességmérési technológia.

3. A kísérletterv érdességi paraméter alapú kiértékelése

Módosított logisztikus függvény segítségével definiáltam az amplitúdó függő érdességi paraméterek kapcsolatát a normálerővel és a koptatási úthosszal, adott mérési körülmények között ($F=0$ N-600 N, $s=0$ mm-10800 mm, száraz súrlódás esetén 1200-as finomságú csiszolóvászson) az abrziós kopás kezdeti szakaszában.

$$S = \frac{\left(\frac{a \cdot F}{1000} + b\right)}{1 + e^{\left(\frac{c \cdot s}{1000} + d\right)}} + \frac{\left(\frac{h \cdot s}{1000} + k\right)}{1 + e^{\left(\frac{l \cdot F}{1000} + m\right)}} + \text{const.}$$

Az abrziós koptatási modellrendszerben, a teljes faktoros kísérlettervnek megfelelően meghatároztam a 9 paraméteres függvény dimenziós együtthatóit az S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku} érdességi jelzőszámokhoz.

4. A kísérletterv és a szimulációs algoritmus kiértékelése a lapultsági mérőszám segítségével

A kifejlesztett csonkoló algoritmus segítségével és a méréseimkor alkalmazott kísérletterben kimutattam – állandó normálerő, csúszási sebesség és abrziós szemcseszerkezet esetén – az S_{ku} paraméter nagyságrendi megváltozása a felület eredeti mikrotopográfiájának megsemmisülését jelzi a kopás kezdeti szakaszának végén. Az abrziós karcok dominanciája a csúcszóna egyre szélesedő platós jellege miatt nő, melyet a topográfia pontok magasság-eloszlási hegyességének változását vonja maga után.

5. A kísérletterv kiértékelése hullámhossz térbe történő transzformációval

Méréseimmel igazoltam, hogy az előtoláshoz tartozó hullámhossz amplitúdók időfüggvénye számszerűsítve jellemzi az abrziós kopási folyamat dinamikáját. A vizsgált kísérletterben megállapítottam, hogy az erő és a koptatási úthossz növekedésével az előtoláshoz tartozó amplitúdó értéke nullához tart, az amplitúdók variációs együtthatója a mikrotopográfia megsemmisülését nagyságrendi növekedésével előre jelzi.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatásom során az abráziós kopás kezdeti szakaszának többszemponútú leírásával foglalkoztam algoritmus és modellkísérletek segítségével száraz súrlódás esetén. A kopási diagram e szakasza összetett fizikai folyamat, melynek csak a kutatási célokban meghatározott részét vizsgáltam. Munkám során a létrehozott csonkoló algoritmus és a modellkísérletek eredménye alkalmas arra, hogy érdességmérési szempontból jellemezhető legyen a kopás kezdeti szakasza és általános következtetéseket lehessen megállapítani.

Kutatói munkám során definiáltam egy olyan algoritmust, mely a kopás kezdeti szakaszát írja le az abráziós karcok figyelembevételével. Az algoritmus tesztelése során bizonyítottam, hogy az abráziós karcok szerepe a kopás kezdeti szakaszának végén nagymértékben befolyásolja a kialakult felületi érdességet. Az iparban elterjedten alkalmazott átlagos érdességű orientált mikrotopográfia esetén megfigyeltem, hogy 60%-70%-os térfogathányadú mikrotopográfia megsemmisülésnél már figyelembe kell venni a karcok hatását a statisztikai paraméterek számolásánál. Az abráziós karcokat is figyelembe vevő algoritmus kifejlesztése után meghatároztam a felület minőségét jellemző a gyakorlati életben profilméréskor alkalmazott érdességi paraméterek értékét.

Kutatásom másik területe az érdességmérés alkalmazásának feltételeivel és abráziós folyamatnál kialakuló felületi minőség kiértékelésével foglalkozott. orientációval nem rendelkező mikrotopográfia esetében megvizsgáltam a hullámossági és érdességi profil alakját különböző szűrési technológia segítségével. Elemzéskor arra a megállapításra jutottam, hogy az M-rendszerben alkalmazott különböző szűrők átviteli függvényük alakja miatt nem definiálják egyértelműen a hullámossági és érdességi profilokat, így munkám során a jelek adatvesztésének elkerüléseként az érdességi és hullámossági jeleket használtam, az alakhibát pedig elsőfokú polinom szűréssel választottam le. Munkám során egy abráziósan koptatott felület segítségével igazoltam, hogy a profilméréssel szemben a mikrotopográfiai mérés pontosabban jellemzi a kialakult felület minőségét.

Kutatásom során adott erő és koptatási úthossz mellett megvizsgáltam az érdességi paraméterek változását és megállapítottam, hogy a csonkoló modell kiértékelésekor használt logisztikus függvény három dimenzióba kiterjesztett alakjával az átlagos egyenetlenség (S_a), az eltérések mértani átlaga (S_q), a ferdeségi (S_{sk}) és lapultsági (S_{ku}) mérőszámok közelíthető értékük a vizsgált erő és koptatási úthossz mellett. A mérések és a csonkoló algoritmus segítségével megállapítottam, hogy az S_{ku} paraméter ugrásszerű növekedése előrejelzi a mikrotopográfia megsemmisülését. A modellkísérlet eredményeit hullámhossztérbe transzformálva megállapítottam, hogy a domináns hullámhosszhoz tartozó PSD amplitúdó jól jellemzi a folyamatos csúcszóna megsemmisülést.

A kutatásom során létrehozott modellek továbbfejleszthetőek, az egyes összefüggések a modellkísérlet alapján kiterjeszthetően más erő- és útintervallumokra is amennyiben az abráziós szemcse csak a csúcszónában változtatja meg a mikrotopográfiát. A csonkoló algoritmus és a statisztikai közelítő függvények lehetővé teszik a mérnöki gyakorlatban, hogy abráziós kopási nyomok esetében az alkatrész a kezdeti kopás szakaszában hol helyezkedik el és a mikrotopográfia hány százaléka semmisült meg.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

ACÉL FELÜLET MIKROTOPOGRÁFIAI VÁLTOZÁSA ABRÁZIÓS KOPÁS KEZDETI SZAKASZÁN

Az alkatrészek tribológiai viselkedésének szempontjából jelentős a kezdeti kopás szakasza. Az adott gyártási technológia által definiált felületi minőség a működés során folyamatosan változik. Ezek a változások határozzák meg az alkatrészek további viselkedését: módosítják például a valós érintkezési tartományt, a hőátadást, a súrlódást és a kenőanyagmegtartó képességet.

Kutatásom célja az volt, hogy érdességmérési technológia segítségével jellemezzem a kopás kezdeti szakaszát. Munkám során megvizsgáltam gyártott felületek minősítésekor széleskörűen alkalmazott érdességi (R) paraméterek alkalmazhatóságát és megállapítottam, hogy a megfelelő jellemzés érdekében a hullámossági (W) és érdességi (R) profil adatok együttes vizsgálata célravezetőbb.

További vizsgálataimnál összehasonlítást végeztem abrázíósan koptatott felületek profil és mikrotopográfiai mérése segítségével. Az érdességi paraméterek variációs együtthatónak segítségével megállapítottam, hogy a kopás kezdeti szakaszának vizsgálatakor az abrázíós szemcse mérete befolyásolja a mérés variációs együtthatóját. Összehasonlító vizsgálatot végeztem profilmérés és mikrotopográfiai mérés segítségével és megállapítottam, hogy a mikrotopográfiai mérés kisebb variációs együtthatóval jellemzi az abrázíósan koptatott felületet.

Kutatásom során egy olyan csonkoló algoritmust fejlesztettem ki, mely az abrázíós karcok hatását is figyelembe veszi a csúcsonában. Az algoritmus tesztelésekor megállapítottam, hogy az érdességi karcoknak a befolyásoló hatása jelentős a kopás kezdeti szakaszának végén. Az algoritmus számolási eredményeinek segítségével adott bemenet (orientált mikrotopográfia és abrázíósan koptatott mikrotopográfia) függvényében meghatároztam 100 lépéses csonkolás esetén az átlagos egyenetlenség (S_a), az eltérések mértani átlaga (S_q), a ferdeségi (S_{sk}) és lapultsági (S_{ku}) paramétereket. Eredményeim statisztikai kiértékelésénél logisztikus függvény segítségével meghatároztam a megsemmisített térfogathányad – érdességi paraméter függvényeket. A modell felépítése alkalmas arra, hogy más megmunkált mikrotopográfia esetén is meghatározza az abrázíós folyamat leírását.

Kutatásom következő lépéseként egy olyan teljes faktoros kísérlettervet valósítottam meg, melynél széles erő és koptatási úthossz tartományban végeztem méréseket 1200-as finomságú csiszolóvászonnal száraz súrlódás esetén. A kísérleteket érdességmérés segítségével kiértékeltem, majd a modellenél alkalmazott függvényalak háromdimenziós kiterjesztésével meghatároztam a függvény paramétereit. Méréseimmel igazoltam továbbá, hogy a kopás kezdeti szakaszának végén az abrázíós karcok domináns hatása miatt az S_{ku} paraméter nagymértékű változása előre jelzi a mikrotopográfia megsemmisülését. Az érdességméréssel meghatározott mikrotopográfiát hullámtérbe transzformáltam, majd megállapítottam, hogy az előtoláshoz tartozó hullámhossz amplitúdó változásának értéke jellemzi csúcsona megsemmisülést.

7. SUMMARY

CHANGES OF THE STEEL SURFACE MICROTOPOGRAPHY DURING RUNNING-IN

The initial stage of wear is significant for the tribological behaviour of the components. The machining parameters defined microtopography changes continuously during the operational effects. These changes are determined by the behaviour of the other components: for example, modify the real contact area, the heat transfer, friction and lubricant properties.

The purpose of my research was to characterize the running-in stage of wear by roughness measurement technology. In my research work I examined roughness (R) applicability to this topic. These parameters widely used to characterize the machined microtopography, but I found that the application of waviness (W) and roughness (R) profile data can be more useful for a description of the surface quality.

Further comparisons were performed profile and microtopography measurement test in a case of abrasive worn specimen. I concluded to the value of variation coefficient of the roughness parameters is depend on the size of the abrasive grain in a case of initial stage of wear. Test were performed using profile measurement and microtopography measurements and found that the measurement of microtopography smaller coefficient of variation is characterized by worn abrasive surface.

During my research is developed a truncated algorithm which considered the effect of the abrasive scratches in the peak zone. During the algorithm testing I found that the roughness of the scratches had significant impacts at the running-in stage. I made 100 step running in a case of oriented microtopography and abrasion worn microtopography. The arithmetical mean height (S_a), the root mean square height (S_q), the skewness (S_{sk}) and kurtosis (S_{ku}) parameters was calculated. In the evaluation of results I determined the relation between the disappeared volume and the roughness parameters by logistic function. The model can be adapted to other machined microtopography description in a case of abrasion process.

Furthermore, full factorial DOE was applied. The DOE represented the roughness parameters in wide range of force and wear path in a case of abrasion and dry friction. The experiments were evaluated by the three dimensional extension of logistic function. According to these function I proved that the modification of parameter named S_{ku} can predict the destruction of the microtopography. The experiments transformed to wavelength space can be characterize the changes of the dominated wavelength amplitude modification and its connection to the peak zone destruction.

8. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Akagaki T., Kato K. (1990), Effects of hardness on the wear mode diagram in lubricated sliding friction of carbon steels. *Wear* 141, pp. 1–15., doi:10.1016/0043-1648(90)90187-F
2. Al-Khalidi G.F., Eyre T.S. (1987), Bore polishing — identification and simulation. *Tribol. Int.* 20, pp. 18–24., doi:10.1016/0301-679X(87)90004-1
3. Archard, J. F., Hirst, W. (1956), Wear of metals under unlubricated conditions, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 236, No. 1206. pp. 397-410.
4. Azarkhin A., Richmond O. (1992), A model of ploughing by a pyramidal indenter—upper bound method for stress-free surfaces, *Wear* 157, pp. 409–418.
5. Barányi I., Czifra Á., Kalácska G. (2011), Felületi mikrotopográfiák fraktál dimenziójának meghatározása. *GÉP* 61, 7–10. o.
6. Bíró, S., Sipos, S., Nagy, A. (2011), Korszerű geometriájú forgácsolólapkák az oktatásban. *Fiatalközvetítő Tudományos Ülésszaka* 16, 41–46. o.
7. Bo Z., You-Bai X. (1989a), Two-body microcutting wear model part I: Two-dimensional roughness model. *Wear* 129, pp. 37–48., doi:10.1016/0043-1648(89)90277-9
8. Bo Z., You-Bai X. (1989b), Two-body microcutting wear model part II: Three-dimensional roughness model. *Wear* 129, pp. 49–58., doi:10.1016/0043-1648(89)90278-0
9. Bo Z., You-Bai X. (1989c), Two-body microcutting wear model part III: Stable profile height distribution of a worn surface. *Wear* 129, pp. 59–66., doi:10.1016/0043-1648(89)90279-2
10. Bo Z., You-Bai X. (1989d), Two-body microcutting wear model part IV: theoretical analysis of friction. *Wear* 129, pp. 67–79., doi:10.1016/0043-1648(89)90280-9
11. Bowden F.P., Tabor, D., Mechanism of friction and lubrication in metal-working, *J Inst. Petroleum* 40, pp. 243-253.
12. Bögel T., Osinenko P., Herlitzius T. (2016), Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. *Soil Tillage Res.* 159, pp. 73–82. doi:10.1016/j.still.2016.02.004
13. Böklin R. (1973), *The Science of Hardness Testing and its Research Applications*, American Society for Metals, Metals Park, OH
14. Boryczko A. (2013), Effect of waviness and roughness components on transverse profiles of turned surfaces. *Measurement* 46, pp. 688–696., doi:10.1016/j.measurement.2012.09.007
15. Brandão J.A., Martins R., Seabra J.H.O., Castro M.J.D. (2015), An approach to the simulation of concurrent gear micropitting and mild wear, *Wear* 324–325, pp. 64–73. doi:10.1016/j.wear.2014.12.001
16. Czifra Árpád (2007), A felületi mikrotopográfia jellemzése fém-fém és fém-kerámia alkatrészek csúszósurlódása során, BME GÉK PhD értekezés.
17. Czifra Á., Goda, T., Garbayo E. (2011), Surface characterisation by parameter-based technique, slicing method and PSD analysis, *Measurement* 44, pp. 906–916. doi:10.1016/j.measurement.2011.02.021
18. De Pellegrin D.V., Stachowiak G.W. (2004), Evaluating the role of particle distribution and shape in two-body abrasion by statistical simulation, *Tribol. Int.* 37, pp. 255–270., doi:10.1016/j.triboint.2003.09.004
19. DHANAPAL A., RAJENDRA. BOOPATHY S. BALASUBRAMANIAN V. (2012), Corrosion behaviour of friction stir welded AZ61A magnesium alloy welds immersed

- in NaCl solutions, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, pp. 793–802., doi:10.1016/S1003-6326(11)61247-8
20. Durst P.J., Mason G.L., McKinley B., Baylot A. (2011) Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters, *Terramechanics* 48, pp. 105–111., doi:10.1016/j.jterra.2010.05.004
21. Fang L., Liu W., Du D., Zhang, X., Xue Q. (2004), Predicting three-body abrasive wear using Monte Carlo methods, *Wear* 256, pp. 685–694., doi:10.1016/S0043-1648(03)00464-2
22. Fubel A., Zech M., Leiderer P., Klier J., Shikin V. (2007), Analysis of roughness of Cs surfaces via evaluation of the autocorrelation function. *Surf. Sci.* 601, pp. 1684–1692. doi:10.1016/j.susc.2007.01.040
23. Gahr K.-H.Z. (1987), *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier.
24. Geringer J., Macdonald D.D. (2014), Friction/fretting-corrosion mechanisms: Current trends and outlooks for implants, *Mater. Lett.* 134, pp. 152–157. doi:10.1016/j.matlet.2014.06.167
25. Hird J.R., Field J.E. (2005), A wear mechanism map for the diamond polishing process. *Wear*, Second International Conference on Erosive and Abrasive Wear 258, pp. 18–25. doi:10.1016/j.wear.2004.09.001
26. Hokkirigawa K., Kato K. (1988), An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribol. Int.* 21, pp. 51–57. doi:10.1016/0301-679X(88)90128-4
27. Horváth R., Lukács J. (2015), Erőtani vizsgálatok acél simító esztergálásánál, *XX Fiala Műszaki Tudományos Ülésszaka*, 167–170. o.
28. Horváth, S. (2008), A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése, PhD értekezés.
29. Hutchings I.M. (1992), *Tribology: friction and wear of engineering materials*. CRC Press.
30. Jacobson S., Wallén P., Hogmark S. (1988), Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new numerical simulation model. *Wear* 123, pp. 207–223. doi:10.1016/0043-1648(88)90100-7
31. Jacobson S., Wallén P., Hogmark S. (1987), Correlation between groove size, wear rate and topography of abraded surfaces. *Wear* 115, pp. 83–93. doi:10.1016/0043-1648(87)90200-6
32. Jiang H., Shao Y., Mechefske C.K. (2014), Dynamic characteristics of helical gears under sliding friction with spalling defect. *Eng. Fail. Anal.* 39, pp. 92–107. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.01.008
33. Jurenka J., Španiel M. (2014) Advanced FE model for simulation of pitting crack growth. *Adv. Eng. Softw.*, Special Issue dedicated to Professor Zdeněk Bittnar on the occasion of his Seventieth Birthday: Part 2 72, pp. 218–225. doi:10.1016/j.advengsoft.2013.06.018
34. Khrushchev M.M., Babichev, M.A. (1970) *Abrasive Wear*, Moscow: Science, 252p. (in Russian)
35. Kovács T., Solecki L. (2008), A szövetszerkezet és a kopásállóság kapcsolata különböző acélok esetén, *Fiala Műszaki Tudományos Ülésszaka* 12, 155–158.o.
36. Kovács K., Váradi K., Palásti K.B. (2000), Microtopographic Analysis of Technical Surfaces by 3D Parameters, *Gép*, 2000 Second Conf. Mech. Eng, pp. 235–240.
37. Kozma Mihály (1994) *Tribológia*. Műegyetem Kiadó, Budapest.
38. Kragelszkij V., Calculation of wear rate, *J. Basic Eng. Transaction of ASME* 64-WA/lub.5.

39. Lawrence K. D., Ramamoorthy B. (2013), Surface topography characterization of automotive cylinder liner surfaces using fractal methods, *Appl. Surf. Sci.* 280, pp. 332–342. doi:10.1016/j.apsusc.2013.04.157
40. le Gal A., M. Klüppel (2008), Investigation and modelling of rubber stationary friction on rough surfaces, *Journal of Physics: Condensed Matter* 25, pp. 1-13.
41. Lim S.C., Ashby M.F. (1987), Overview no. 55 Wear-Mechanism maps, *Acta Metall.* 35, pp. 1–24. doi:10.1016/0001-6160(87)90209-4
42. Líska K. (2011), CAM stratégiák hatásai a felületek mikro és makrogeometriai tulajdonságaira, *Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszaka* 16, 185–188. o.
43. Liu X., Wang H., Shan Y., He T. (2015), Construction of road roughness in left and right wheel paths based on PSD and coherence function, *Mech. Syst. Signal Process.* 60–61, pp. 668–677, doi:10.1016/j.ymsp.2015.01.034
44. Metals A.S. (1973), *The Science of hardness testing and its research applications.* American Society for Metals.
45. Mishina H., Hase A. (2013), Wear equation for adhesive wear established through elementary process of wear, *Wear* 308, pp. 186–192. doi:10.1016/j.wear.2013.06.016
46. Okoshi M., Sakai H. (1941), Researches on the mechanism of abrasion. Report III, mechanism of abrasion of cast iron and steel, *Trans JSME* 7, pp. 29–47.
47. Palásti K. B., Kovács K., Pálincás T., Váradi K. (2001), A TopSurf, PC-vel vezérelt 3D-s érdességmérő műszer, *Műszerügyi És Méréstechnikai Közlemények*, 43–56. o.
48. Peng Y., Wu T., Wang S., Peng Z. (2015), Oxidation wear monitoring based on the color extraction of on-line wear debris, *Wear*. doi:10.1016/j.wear.2014.12.047
49. Peterson M. B., Winner W.O. (1980), *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers, New York.
50. Pinke P. (2013), Az acél karbontartalmának hatása a kopási folyamatra. *Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszaka* 18, 315–318. o.
51. Poul-Erik Hansen, Gert Roebben (2010), *Introductory Guide to Nanometrology.* The European Commission and the participating consortium partners.
52. *Proceedings of the ASME Tribology Division: Presented at ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2007, ASME.*
53. Rabinowicz E. (1983), The wear of hard surfaces by soft abrasive, *Int. Conf. Wear Mater*, ASME, pp. 12–18.
54. Radhakrishnan V (1970), Effect of stylus radius on the roughness values measured with tracing slyus instruments, *Wear* pp. 325–335.
55. Raja J., Muralikrishnan B., Fu S., (2002), Recent advances in separation of roughness, waviness and form, *Precis. Eng.* 26, pp. 222–235. doi:10.1016/S0141-6359(02)00103-4
56. Rao R.N., Das S., Mondal D.P. Dixit, G. Tulasi Devi S.L. (2013), Dry sliding wear maps for AA7010 (Al–Zn–Mg–Cu) aluminium matrix composite, *Tribol. Int.* 60, pp. 77–82. doi:10.1016/j.triboint.2012.10.007
57. Reason R. E., Hopkins M. R., Garrod R. I. (1944), *Report on the measurement of surface finish by stylus methods*, Taylor Hobson, Leicester.
58. Rowe W.B. (2014), 17 - Mechanics of Abrasion and Wear, in: Rowe, W.B. (Ed.), *Principles of Modern Grinding Technology (Second Edition).* William Andrew Publishing, Oxford, pp. 349–379.
59. Sampaio A.L., Lobão D.C., Nunes L.C.S., dos Santos P.A.M., Silva L., Huguenin J.A.O. (2011), Hurst exponent determination for digital speckle patterns in roughness control of metallic surfaces, *Optics and Lasers in Engineering* 49-1, pp. 32-35.
60. Shen F., Hu W., Meng Q. (2015), A damage mechanics approach to fretting fatigue life prediction with consideration of elastic–plastic damage model and wear, *Tribol. Int.* 82, Part A, pp. 176–190. doi:10.1016/j.triboint.2014.10.017

61. Stout K.J., Blunt L. (2000) Three-Dimensional Surface Topography, Penton Press, London.
62. Taylor T.A., Thompson B.W., Aton W. (2007), High speed rub wear mechanism in IN-718 vs. NiCrAl–Bentonite. Surf. Coat. Technol., ICMCTF 2007 34th International Conference and Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2007) 202, pp. 698–703. doi:10.1016/j.surfcoat.2007.05.054
63. Thomas T.R. (1998) Rough Surface, Imperial Collage Press. ed. London.
64. Torrance A.A. (1981), A new approach to the mechanics of abrasion, Wear 67, pp. 233–257. doi:10.1016/0043-1648(81)90107-1
65. Valasek (1996), Tribológiai kézikönyv, Tribotechnik Kft, Budapest.
66. Vámos (1983), Tribológiai kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
67. Vepsäläinen L., Stenberg P., Pääkkönen P., Kuittinen M., Suvanto M., Pakkanen T.A. (2013) Roughness analysis for textured surfaces over several orders of magnitudes. Appl. Surf. Sci. 284, pp. 222–228. doi:10.1016/j.apsusc.2013.07.085
68. Wang W., Wong P.L. (2000), Wear volume determination during running-in for PEHL contacts. Tribol. Int. 33, pp. 501–506. doi:10.1016/S0301-679X(00)00091-8
69. Whitehouse D.J. (1994), Handbook of surface metrology. Inside of Phisics Publ., Bristol.
70. Xu D.-M., Yong R.N. (1993), Autocorrelation model of road roughness. J. Terramechanics 30, pp. 259–274. doi:10.1016/0022-4898(93)90014-O
71. Ying T. N. (1996), Wear Mechanisms for Ductile and Brittle Materials in a Micro-Contact. Ph.D dissertation. University of Maryland, Maryland.
72. Zsidai L., Kalacska G., (2014), “Stick-slip” PA és PEEK kompozitok súrlódásánál henger/sík modell vizsgálati rendszerben. Műa. És Gumi 51 (12), 462–470. o.

Hivatkozott szabványok:

73. DIN 4760-1982: Form Deviations; Concepts; Classification System
74. ASME B46.1-2009: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)
75. ISO 4287:1996: Surface Roughness
76. DIN 50320-79: Wear, Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena
77. EN10083/2-2006 Steels for quenching and tempering

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Lektorált cikk világnyelven:

1. **Barányi I.**, Keresztes R., Szakál Z., Kalácska G. (2010), Power spectral density analysis of machined surfaces, Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Vol. 38, Issue 2, pp. 83-88.
2. **Barányi I.**, Keresztes R., Szakál Z., Kalácska G. (2016), Prediction of surface roughness parameters by new experimentally validated modelling algorithm under abrasive condition, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 13, Issue 7, pp. 197-208, ISSN 1785-8860
3. **Barányi I.**, Czifra Á., Kalácska G. (2011), Height-independent topographic parameters of worn surfaces, Sustainable Construction and Design, Vol. 2, Issue 1, pp. 35-40, ISSN: 2032-7471
4. **Barányi I.**, Kalácska G., Czifra Á. (2011), Three dimensional Fourier analysis of the surface microtopography, Mechanical Engineering Letters, Vol. 5, pp. 161-165, HU ISSN 2060-3789
5. **István Barányi** (2013), Influence of abrasion wear process on amplitude roughness parameters, Mechanical Engineering Letters, Vol. 9, pp. 16-20, HU ISSN 2060-3789
6. **Barányi I.**, Kalácska G., P. De Baets (2013), Characterisation of abrasive worn surfaces by surface microtopography parameters, Sustainable Construction and Design, Vol. 4, Issue 2, pp. 1-4, ISSN: 2032-7471, <http://ojs.ugent.be/SCAD/article/view/1036/1052>

Lektorált cikk magyar nyelven

7. **Barányi I.**, Czifra Á. (2009), Különböző megmunkálású felületek vizsgálata amplitúdó sűrűség spektrum (PSD) analízissel, GÉP, 60. évf., 10-11 sz., 7-10. o.
8. **Barányi I.**, Czifra Á., Kalácska G. (2010), Felületi mikrotopográfiák fraktál dimenziójának meghatározása, GÉP, 61. évf., 9-10 sz., 7-10. o.
9. **Barányi I.** (2016), Abráziós kopás kezdeti szakaszának jellemzési lehetőségei érdességméréssel, Mezőgazdasági Technika, Mezőgazdasági Technika, 2016. augusztus, 2-4. o.
10. **Barányi István** (2016), Abráziósan koptatott felületek érdességi paramétereinek vizsgálata, GÉP, 67. évf., 5-6 sz., 10-13. o.

Nemzetközi konferencia kiadvány:

11. **Barányi I.**, Czifra Á., Horváth S., Kalácska G. (2010), Power spectral density (PSD) analysis of worn surface, Gépészet 2010: Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering., Budapest, Magyarország, 2010.05.25.-2010.05.26., pp. 1-6., ISBN:978-963-313-007-0
12. **Barányi I.**, Czifra Á., Kalácska G. (2011), Power spectral density (PSD) analysis of machined surfaces, IX. International Multidisciplinary Conference, Nyíregyháza, 2011.05.19.-2011.05.21., pp. 37-43.
13. **Barányi István**, Kalácska Gábor, Czifra Árpád, Szakál Zoltán (2011), Analysis of the turned profile roughness based on wavelength technology, Proceedings of the 1st Regional Conference – Mechatronics in Practice and Education (MECH-CONF 2011), Subotica, Serbia, 2011.12.08.-2011.12.10., pp. 56-59., ISBN 978-86-85409-67-7
14. Czifra Árpád, **Barányi István**, Kalácska Gábor (2011), Fractal analysis of microtopographies in wear, Ecotrib 2011, 3rd European conference on tribology, Bécs, Ausztria, 2011.06.09., pp. 593-597.
15. **István Barányi** (2013), The modification of the roughness parameters in the wear process, 2nd Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education (MECHEDU 2013), Subotica, Serbia, 2013.12.05.-2013.12.06., pp. 107-112., ISBN:978-86-7892-565-8

Magyar nyelvű kiadvány:

16. Varga Péter, **Barányi István**, Kalácska Gábor (2011), Felületi érdesség mérésekor alkalmazott szűrőstechnika gyakorlati kérdései, Műszaki Tudományos Füzetek 2011: Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka 16, Kolozsvár, Románia, 2011.03.24-2011.03.25., 365-368.o.
17. Renner T., **Barányi I.**, Pék L.(2011), Sörétezett és korundszórással felületkezelt acél alkatrészek mikrotopográfiai vizsgálata, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka: XVI.: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2011.03.24-2011.03.25., 257-260. o.
18. **Barányi I.**, Czifra Á, Kalácska G (2012), Műszaki műanyagok súrlódási vizsgálata az érdességi paraméterek függvényében, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XVII.: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2012.03.22-2012.03.23., 31-34. o.
19. **Barányi I.**, Gonda V. (2013), Abráziósan koptatott felületek mikrotopográfiájának jellemzése az érdességi paraméterekkel, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XVIII.: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2013.03.21-2013.03.22., 61-64. o.
20. **Barányi István**, Czifra Árpád, Kalácska Gábor (2014), Abráziós folyamat kiértékelési lehetőségei profil és mikrotopográfiai mérésnél, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XIX. Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2014.03.20-2014.03.21., 49-53. o.
21. **Barányi István** (2015), Abráziósan koptatott felületek kiértékelése érdességmérés segítségével a kopás kezdeti szakaszában, Műszaki Tudományos Közlemények 3, Kolozsvár, Románia, 2015.03.19-2015.03.20., 71-74.o.
22. **Barányi István** (2016), Az abráziós kopás kezdeti szakaszának jellemzése szimulációs modell segítségével, Műszaki Tudományos Közlemények 5, Kolozsvár, Románia, 2016.03.17-2014.03.18., 85-88. o.

Egyéb:

23. Á Czifra, **I Barányi** (2016), Tribological aspects for reliable operation of engineering surfaces, Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary pp. 35-45. ISBN:978-3-319-28090-5

M3. Mikrotopografia hullámtérbe transzformálásához és elemzéséhez használt MatLab leíró fájl

```
meret=size(kimenet);
adatszamx=meret(1);
adatszamy=meret(2);
m=2^nextpow2(adatszamx);
n=2^nextpow2(adatszamy);
for i=(adatszamx+1):m
    for j= adatszamy+1:n
        kimenet(i,j)=0;
    end;
end;
x=2:2:(2*n); % LÉPÉSKÖZ MIATT SZORKETTO tengelyfelirat
y=1:1:m; % profilok száma
% FFT
format long;
Fs=0.5; %Mintavétel frekvenciája
f = linspace(0,Fs,n); %frekvencia sor létrehozása
T=f.^-1; %periódus vektor
for i=1:n
    for j=1:m
        jel=kimenet(i,:);
    end;
    a = (fft(jel))/(n/2);% FFT függvény meghívása
    absa=abs(a);
    psdki(i,:)=absa;
end;
High=max(psdki);
Hhigh=max(High)
psdosszeg=0;
for k=1:501
    l=6;
    psdosszeg=psdosszeg+psdki(k,l);
    psdjelemzo(k)=psdki(k,l);
end;
psdatlag=psdosszeg/501
szoras=std(psdjelemzo)
cv=szoras/psdatlag*100
```

M4. Csonkoló algoritmus MATLAB leíró fájl síkkal foltozás esetén

```

sizexy=size(megmunkalt);

inonecoloumn=zeros(sizexy(1)*sizexy(2),1);
for i=1:sizexy(1)
    for j=1:sizexy(2)
        numb=(i-1)*sizexy(2)+j;
        inonecoloumn(numb)=megmunkalt(i,j);
    end
end
sortedcoloumn=sort(inonecoloumn);
movetopositive=-1*sortedcoloumn(1);
movedtopography=zeros(sizexy(1),sizexy(2));
heightszum=zeros(1,1);
for i=1:sizexy(1)
    for j=1:sizexy(2)
        movedtopography(i,j)=megmunkalt(i,j)+movetopositive;
        heightszum(1)=heightszum(1)+movedtopography(i,j);
    end
end
end
numberoftruncation=100;
truncationelementnum=zeros(numberoftruncation,1);
for i=1:numberoftruncation

truncationelementnum(i+1)=round(numb/numberoftruncation*i)
;
end
truncationelementnum(1)=1;
truncationheight=zeros(numberoftruncation,1);
for i=1:(numberoftruncation+1)

truncationheight(i)=sortedcoloumn(truncationelementnum(i))
;
end

truncated=zeros(numberoftruncation,sizexy(1),sizexy(2));
for k=1:numberoftruncation
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            if truncationheight(k)> megmunkalt(i,j)
                truncated(k,i,j)=megmunkalt(i,j);
            else
                truncated(k,i,j)=truncationheight(k);
            end
        end
    end
end
end
% normálás

```

```

truncnorm=zeros(numberoftruncation,sizexy(1),sizexy(2));
x=0:0.002:(sizexy(1)-1)*0.002;
y=0:0.002:(sizexy(2)-1)*0.002;
ft = fittype( 'poly11' );
h = waitbar(0,'Initializing waitbar...');
for k=1:numberoftruncation
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            matrix(i,j)=truncated(k,i,j);
        end
    end
    [x0, y0, z0] = prepareSurfaceData( x, y, matrix);
    sf = fit( [x0, y0], z0, ft );
    coeffvalues(sf);
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            truncnorm(k,i,j)=truncated(k,i,j)-sf.p00-
sf.p01*x(i)-sf.p10*y(j);
        end
    end
waitbar(k/numberoftruncation,h,'kész')
end
% Sa paraméter meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    absszum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            absszum=absszum+abs(truncnorm(k,i,j));
        end
    end
    Sa(k)=absszum/(sizexy(1)*sizexy(2));
end
% Sq paraméter meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j);
        end
    end
    Sq(k)=sqrt(szum/(sizexy(1)*sizexy(2)));
end
% Ssk meghatározása
for k=2:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)

```

```
szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,
j);
    end
    end
    Ssk(k-1)=szum/(sizexy(1)*sizexy(2))/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k);
end
% Sku meghatározása
for k=2:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)

szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,
j)*truncnorm(k,i,j);
            end
        end
        Sku(k-
1)=szum/(sizexy(1)*sizexy(2))/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k);
    end
```

M5. Csonkoló algoritmus MATLAB leíró fájl abrázíós mikrotopográfia foltozás esetén

```

sizexy=size(megmunkalt);
inonecoloumn=zeros(sizexy(1)*sizexy(2),1);
for i=1:sizexy(1)
    for j=1:sizexy(2)
        numb=(i-1)*sizexy(2)+j;
        inonecoloumn(numb)=megmunkalt(i,j);
    end
end
sortedcoloumn=sort(inonecoloumn);
movetopositive=-1*sortedcoloumn(1);
movedtopography=zeros(sizexy(1),sizexy(2));
heightszum=zeros(1,1);
for i=1:sizexy(1)
    for j=1:sizexy(2)
        movedtopography(i,j)=megmunkalt(i,j)+movetopositive;
        heightszum(1)=heightszum(1)+movedtopography(i,j);
    end
end
end
numberoftruncation=100;
truncationelementnum=zeros(numberoftruncation,1);
for i=1:numberoftruncation

truncationelementnum(i+1)=round(numb/numberoftruncation*i)
;
end
truncationelementnum(1)=1;
truncationheight=zeros(numberoftruncation,1);
for i=1:(numberoftruncation+1)

truncationheight(i)=sortedcoloumn(truncationelementnum(i))
;
end
truncated=zeros(numberoftruncation,sizexy(1),sizexy(2));
for k=1:numberoftruncation
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            if truncationheight(k)> megmunkalt(i,j)
                truncated(k,i,j)=megmunkalt(i,j);
            else

truncated(k,i,j)=truncationheight(k)+grinded(i,j);
            end
        end
    end
end
end
% normálás
truncnorm=zeros(numberoftruncation,sizexy(1),sizexy(2));

```

```

x=0:0.002:(sizexy(1)-1)*0.002;
y=0:0.002:(sizexy(2)-1)*0.002;
ft = fittype( 'poly11' );
h = waitbar(0,'Initializing waitbar...');
for k=1:numberoftruncation
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            matrix(i,j)=truncated(k,i,j);
        end
    end
    [x0, y0, z0] = prepareSurfaceData( x, y, matrix);
    sf = fit( [x0, y0], z0, ft );
    coeffvalues(sf);
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            truncnorm(k,i,j)=truncated(k,i,j)-sf.p00-
sf.p01*x(i)-sf.p10*y(j);
        end
    end
waitbar(k/numberoftruncation,h,'kész')
end
% Sa paraméter meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    absszum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            absszum=absszum+abs(truncnorm(k,i,j));
        end
    end
    Sa(k)=absszum/(sizexy(1)*sizexy(2));
end
% Sq paraméter meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)
            szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j);
        end
    end
    Sq(k)=sqrt(szum/(sizexy(1)*sizexy(2)));
end
% Ssk meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)

```

```
szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,
j);
    end
    end
    Ssk(k)=szum/(sizexy(1)*sizexy(2))/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k);
end
% Sku meghatározása
for k=1:numberoftruncation
    szum=0;
    for i=1:sizexy(1)
        for j=1:sizexy(2)

szum=szum+truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,j)*truncnorm(k,i,
j)*truncnorm(k,i,j);
            end
        end

Sku(k)=szum/(sizexy(1)*sizexy(2))/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k)/Sq(k);
end
```


9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani szüleimnek a támogatásukért.

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Kalácska Gábornak és Dr. Czifra Árpádnak, akik elvállalták a témavezetésem. Köszönöm a velem szemben tanúsított türelmüket, valamint hogy biztosították a kutatómunkám végzéséhez szükséges feltételeket, a megfelelő tudományos fórumokon való publikálási lehetőségeket.

Köszönetnyilvánításomban külön kiemelném a Szent István Egyetem Gépipari Technológiai Intézet dolgozóit, akik az IPMP program keretein belül és azon kívül is kérdéseikkel és tanácsaikkal elősegítették elmélyülésem a témámban.

Szeretném megköszönni továbbá Dr. Palásti Kovács Bélának és Dr. Horváth Sándornak, hogy elindították az érdességmérés és kiértékeléstechnika útján.

Köszönöm Dr. Andó Mátyásnak, aki átadta az algoritmusok tesztelésében nyújtott tapasztalatát. Az együtt eltöltött CEEPUS pályázati idő sokat formált a látásmódomon.

Köszönöm támogató segítségét és biztatását dr. Gyurcsovics Lajosnénak.

Köszönöm Pálinkás Tibornak a koptató berendezés működésének megismerésében nyújtott segítséget és a lelkesítő szavakat, miközben a méréseket végeztem.

Szeretném megköszönni Dr. Réti Tamásnak, és Dr. Réger Mihálynak, Dr. Horváth Richárdnak és Varga Péternek a beszélgetéseket, mellyel átsegítettek a hullámvölgyeken.

Köszönetemet fejezem ki mindazok felé, akiket név szerint ugyan nem említettem meg, de hozzájárultak magánéletemben e munka létrejöttéhez.

ACKNOWLEDGEMENT

Here I'd express my thanks to Jacob Sukumaran for his stimulating collaboration on roughness measurement and filtering topic. Discussions with Jacob have been illuminating.