

MŰSZAKI FELÜLETEK FRAKTÁL ALAPÚ VIZSGÁLATA

FRACTAL ANALYSIS OF ENGINEERING SURFACES

Czifra Árpád, PhD

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

ABSTRACT

Tribological behaviour – friction, wear and lubrication – of machine elements highly depends on the operating state and also the original topography of working pair.

The aim of this study was to compare the capability of two fractal characterisation methods for profiles in case of different machining techniques. Power spectral density and height difference correlation function was used to calculate the fractal dimension.

1. BEVEZETÉS

Műszaki felületek tribológiai szempontú tervezése megköveteli a felületi mikrotopográfia ismeretét és előírását. A felületi érdesség 2D-s paraméterekkel történő jellemzése szabványosan ugyan jól definiált, de korlátai az elmúlt évtizedekben egyre nyilvánvalóbbá váltak: több szerző, köztük Thomas [1] megállapítja, hogy a módszer igen érzékeny a mintavételi távolságra, a mérési hosszra, valamint a szűrési beállításokra.

Napjainkra a paraméter alapú topográfiai jellemzésen túl két domináns kutatási irányvonal figyelhető meg. Az egyik a felület lokális jellegzetességeit felismerő és értékelő érdességcsúcs- és karc-elemző technika, míg a másik a topográfia „globális” jellemzését megcélzó összetett matematikai módszerekkel történő értékelés. Ezen utóbbiak közül igen érdekes a fraktál alapú technika, mely számos támogatót és legalább ennyi ellenzőt mondhat magáénak. A fraktál technika, melyet Mandelbrot [2] dolgozott ki részleteiben, felületek önhasonlóságára alapulva matematikai módszereken nyugszik, ugyanakkor valós műszaki felületek esetén számos kérdést felvet.

A működő felületek mikro- és nanotopográfiaiból nyert információk napjaink sűrűdési és kopási modelljeiben input adatként jelennek meg. Ezen modellek előszeretettel alkalmazzák a fraktál fogalmat (ld: Persson [3] vagy Klüppel [4] munkáit).

Műszaki felületek esetén megfigyelhető a fraktál – önhasonló – jelleg, ugyanakkor a fraktál dimenzió pontos meghatározása már nehézkes és bizonytalan feladat. Egyes szerzők (pl: [5]) szerint a legtöbb felület esetén nem is használható egyetlen fraktál dimenzió, hanem – bevezetve a bi- és multifraktál fogalmat – adott frekvenciatartományokra értelmezik a fraktáldimenziót.

Jelen munkám célja különböző megmunkálású felületek 2D-s profilvizsgálata amplitúdó sűrűség spektrum és magasságkülönbség korrelációs módszerekkel, annak érdekében, hogy a két eljárással számított fraktál dimenzió és a felület jellege közötti kapcsolatot feltárjam.

2. ELMÉLETI ALAPOK

Műszaki felületek mikrotopográfiájának hullámhossz és fraktál információi számos eljárással meghatározhatók. Jelen munkámban PSD és HDCF alapú technikákat alkalmaztam. A helytartományból frekvenciatartományba való áttérés Fourier-transzformációval történik, melynek eredményeit a teljesítmény sűrűség spektrummal (PSD) jellemezzük. A 2D-s PSD függvény előállítható a véletlen jel közvetlen Fourier-transzformáltjával. Ez a megközelítés a valós téréből átvezet a frekvenciatérbe, megjelenítve a jelben felfedezhető hullámhosszakot.

Egy diszkrét pontokból álló profil Fourier transzformáltja az (1) egyenlet szerint határozható meg.

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

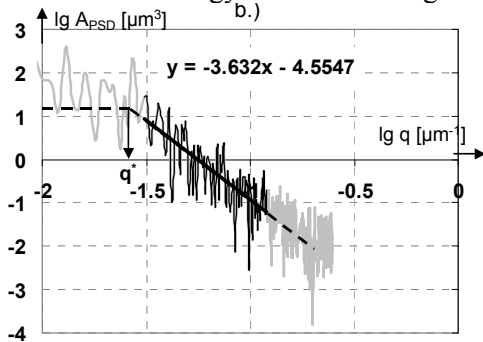
ahol q_p a p -edik frekvencia, Δx a mintavételi lépésköz, $z(x_i)$ az x_i helyen lévő magasságkoordináta, N a profil pontjainak száma.

A transzformáció eredménye két formában jeleníthető meg: egyrészt a hullámhossz függvényében lineáris léptékben, ahol kiugró lokális maximumként megjelennek a profilkra jellemző domináns hullámhosszak, másrészt a frekvencia logaritmusának függvényében, ahol a PSD-re illesztett egyenes me-

redektségéből meghatározható a felület fraktál dimenziója (ld: [3]):

$$Df = 3 + m/2, \quad (2)$$

ahol m az illeszkedő egyenes meredeksége.



1. ábra. PSD görbe

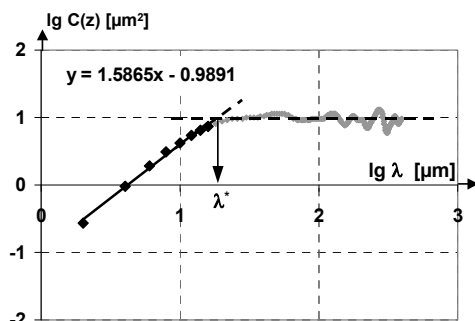
A logaritmusos léptékű PSD görbe a felületek olyan jellegét domborítja ki, melyet a hagyományos technikák rejtve hagynak. A magasságkülönbség korreláció ugyancsak a felületnek ezt a jellegét igyekszik megfogni más eszközökkel. Klüppel és társai [4] által gumi súrlódási modellekben használt magasságkülönbség korrelációs függvény a (3) szerint értelmezhető, ahol λ a hullámhossz, $z(x)$ az x helyen értelmezett magasságkoordináta, $z(x+\lambda)$ az $(x+\lambda)$ helyen értelmezett magasságkoordináta, $\langle \cdot \rangle$ számtani átlag a teljes x tartományra.

$$C_z(\lambda) = \langle ((z(x+\lambda) - z(x))^2) \rangle \quad (3)$$

A magasságkülönbség értékeket a hullámhossz logaritmusának függvényében alkalmazva olyan görbéhez jutunk, melynek lineáris szakasza a felület fraktál dimenziójával van összefüggésben:

$$Df = 2 - m/2, \quad (6)$$

ahol m az illeszkedő egyenes meredeksége.



2. ábra. Magasságkülönbség korrelációs függvény

3. VIZSGÁLT FELÜLETEK

Munkám során négyféle megmunkálású felület elemzését végeztem el (E=esztergált, K=köszörült; M=mart, S=szikraforgácsolt). A gyártási eljárásoknál eltérő átlagos felületi érdességű és egyenetlenség magasságú topográfiákat választottam ki. Esztergálás esetén két megmunkált felületet, köszörülésnél három felületet, marásnál négy felületet, szikraforgácsolásnál pedig egyet vizsgáltam. A méréseket 2 µm-es mintavétellel végeztem, 1 mm profilszakaszokon (3-3 profilon minden megmunkálásra) Mahr Perthometer Concept típusú berendezésen FRW-750 90°-os csúcscsögű 5 µm csúcsgugarú tapintóval.

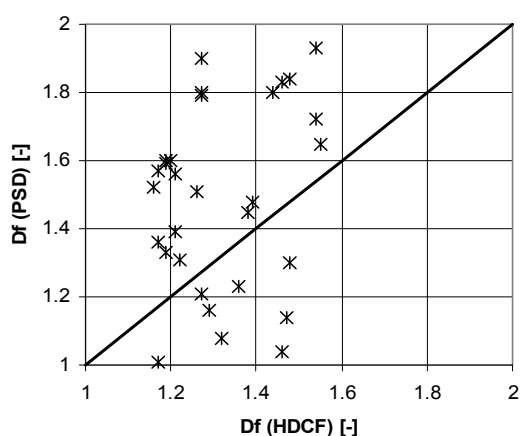
4. EREDMÉNYEK

A vizsgálat eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Vizsgált profilok átlagos érdességük, maximális érdességük, és fraktál dimenzióik

	Ra [µm]	Rt [µm]	Df (HDCF) [-]	Df (PSD) [-]	
E1	1,09	8,13	1,19	1,59	1,57
	1,13	9,67	1,19	1,51	
	1,13	8,05	1,2	1,6	
E2	2,99	13,69	1,17	1,57	1,48
	3,02	13,50	1,16	1,52	
	2,97	13,65	1,17	1,36	
K1	0,48	3,60	1,29	1,16	1,15
	0,51	3,72	1,27	1,21	
	0,52	3,57	1,32	1,08	
K2	2,11	9,08	1,38	1,45	1,39
	1,62	8,34	1,39	1,48	
	1,64	9,09	1,36	1,23	
K3	0,49	3,28	1,46	1,83	1,82
	0,52	3,43	1,44	1,8	
	0,51	3,43	1,48	1,84	
M1	0,55	2,65	1,54	1,72	1,77
	0,53	2,90	1,55	1,65	
	0,55	3,13	1,54	1,93	
M2	2,52	10,51	1,46	1,04	1,16
	2,61	11,50	1,47	1,14	
	2,73	13,06	1,48	1,3	
M3	2,43	14,67	1,22	1,31	1,54
	3,06	19,70	1,26	1,51	
	3,90	23,50	1,27	1,8	
M4	1,84	13,38	1,27	1,79	1,76
	2,03	14,77	1,27	1,9	
	1,89	14,10	1,19	1,6	
S1	1,74	9,59	1,17	1,01	1,32
	1,78	9,59	1,21	1,39	
	1,33	8,46	1,21	1,56	

Az eredmények értékelése során meg kell állapít-suk, hogy sem az amplitúdó paraméterekkel, sem egymással nincsenek korrelációban a kétféle módon számolt fraktál dimenzió értékek. Az Ra és Rt paraméterekkel való korreláció nem elvárt, sőt a Df értékek a „teljes spektrum analízis” révén figyelembe veszik a kis hullámhosszú összetevőit is a felületnek, míg az amplitúdó paramé-terek alapvetően a domináns hullámhossztól függenek. A 3. ábrán szereplő diagram pontjai egy-egy profilhoz tartozó HDCF és PSD alapon számolt fraktál dimenzió értékét mutatják. Az elméleti 45° -os egyenestől szinte kivétel nélkül távol esnek a pontok. Ez komolyan megkérdője-lezi a módszerek – legalábbis az egyik – megbíz-hatóságát.



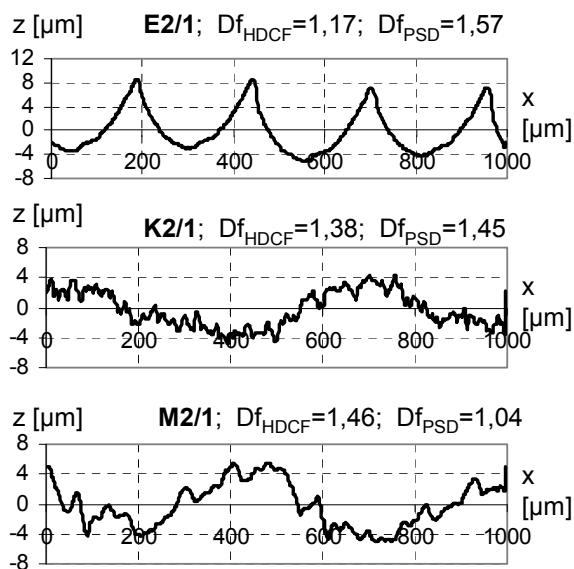
3. ábra. Kétféle technikával számolt fraktál di-
menzió értékek

Tudjuk, hogy az Ra paraméter kis szórása az azonos felülethez tartozó három profil esetében a felületi megmunkálás homogenitására utal. Ez a felületek többségénél teljesül is; kivételt csak a K2 és M3, valamint az S1 jelű felületek jelente-nek. Az Rt paraméter a profil szélsőértékeiből kerül meghatározásra, így nagyobb ingadozása a legtöbb esetben természetes. Jól jellemzi az E2 jelű esztergált felület megmunkálásának – elvárt – egyenletességét a paraméter kis ingadozása.

Fontos észrevennünk, hogy az azonos felületek-
hez tartozó 3-3 profil esetén a magasságkülön-
ség korrelációból meghatározott fraktál dimenzió
érték alig szór (maximális eltérés a 3 érték között
M4 esetén tapasztalható: 0,08), míg PSD estén a
legkisebb eltérés (K3 esetén) 0,04, a legnagyobb
S1-nél 0,55.

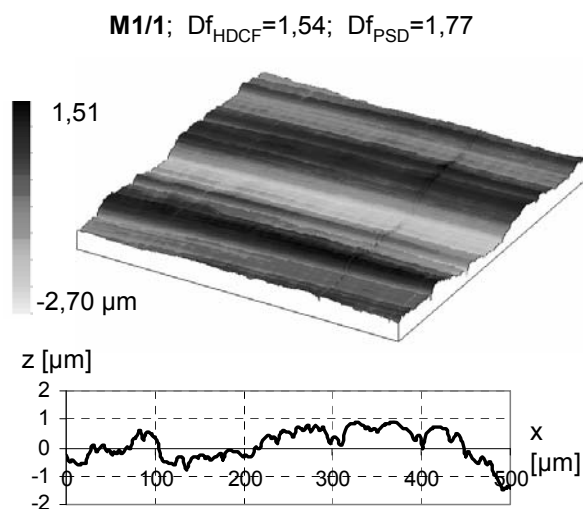
Felületek fraktál dimenziójának értelmezésére
többféle magyarázat is létezik. A gyakorlat szá-
mára talán legérthetőbb és leghasznosabb az az
értelmezés, mely a fraktál dimenziót mint a felü-
let tagoltságát jellemző mennyiséget értelmezi.

Ebből a szempontból megvizsgálva az eredmé-
nyeket a 4. ábra alapján úgy tűnik, hogy a HDCF
analízis megbízhatóbb értékeket ad: az esztergált
felület sokkal kevésbé tagolt, mint a mart vagy a
köszörült, így ott kisebb Df értéket várunk.



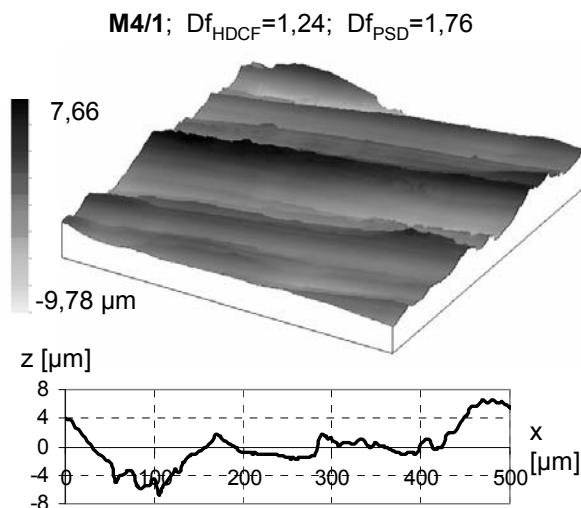
4. ábra. Profilok és fraktál dimenzió értékeik

Topográfiaiak estén talán még szembetűnőbb a
különbség. Két különböző marási megmunkálás
esetén mutatja az 5. és 6. ábra a felület egy 1
 mm^2 -es részét, valamint egy rövid profildarabot.
Az M1 (5. ábra) felület esetén kapjuk a legna-
gyobb Df értéket a HDCF analízisből. A finoman
megmunkált felület magán viseli a megmunkálás
előtolási nyomait, de a kivett profildarabon jól
látszik, hogy a szerszám számos további nyomot
hagyott a felületen.



5. ábra. Mart felület (M1; $1 \times 1 \text{ mm}$) és a felület
egy profildarabja

Az M4 jelű mart felület jóval durvább megmunkálási nyomokat tartalmaz, mint M1, miközben hasonló nagyságú az előtolás mértéke a topográfiai nyomok alapján. A HDCF fraktál dimenziója itt mindössze 1,24, azaz jóval kevesebb, mint M1 esetén. A PSD görbéből nagyon hasonló D_f értéket kapunk a két felületre (1,77 és 1,76). A 6. ábra tanúsága szerint a felület – bár durvább – sokkal kevésbé tagolt.



6. ábra. Mart felület (M4; 1x1 mm) és a felület egy profildarabja

Míndezek után a fraktál dimenzió HDCF alapon történő kiértékelését elfogadva az 1. táblázat eredményeit alapul véve elmondhatjuk, hogy az egyes megmunkálások nem kategorizálhatók a fraktál dimenzió alapján. Egyedül az esztergálást emelhetjük ki, mint alacsony D_f értékkel rendelkező megmunkálást, de további vizsgálatok szükségesek az ilyen irányú következtetések megerősítésére.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatokból az alábbi következtetések vonhatók le:

- Műszaki felületek esetén a mért profilok fraktál dimenziója és amplitúdó paraméterei nem mutatnak korrelációt.
- A vizsgált felületek esetén azt tapasztaltam, hogy a PSD-ből számolt D_f érték nem ad megbízható eredményeket, míg a HDCF analízis D_f értékei a fraktál matematikai definíciójának megfelelően viselkednek: tagolt felület esetén

nagyobb, kevésbé tagolt esetben kisebb értéket adnak.

- Az elvégzett vizsgálatok alapján az egyes gyártástechnológiai eljárások nem különíthetők el fraktál dimenziójuk alapján.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen cikk az ÓE-RH-1193/3-2011 számú téma: „Működéshez optimált mikrotopográfiák tervezése és gyártása” című téma keretében készült.

7. IRODALOM

- [1] THOMAS, T. R., ROSÉN, B. G.: Determination of the sampling interval for rough contact mechanics, Tribology International 33, p. 601-610 (2000)
- [2] MANDELROT, B. B.: The fractal geometry of Nature. W. H. Freeman and Company, New York (1977)
- [3] PERSSON, ALBOHR, TRATAGLINO, VOLOKITIN, TOSATTI. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. J. Phys, Condens. Matter 17, R1-R62 (2005)
- [4] KLÜPPEL, M., MÜLLER, A., LE GAL, A., HEINRICH, G.: Dynamic contact of tires with road tracks, Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, San Francisco, April 28-30 (2003)
- [5] WU, J., J.: Structure function and spectral density of fractal profiles, Chaos, solitons and fractals, 12, 2481-2492 (2001)