

# FELÜLETI MIKROTOPOGRÁFIÁK FRAKTÁL DIMENZIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA

## FRactal Dimesion of Surface Microtopographies

BARÁNYI ISTVÁN\*, KALÁCSKA GÁBOR\*\* Prof. Dr., CZIFRA ÁRPÁD\*, Dr.

\*Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

\*\*Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

### ABSTRACT

Nowadays to characterise surface microtopographies fractal analysis becomes more and more popular. Calculating fractal dimension several methods are available. In this paper two – wildly used – method are applied to calculate the fractal dimension of engineering surfaces produced different surface finishing techniques. Results show the week point and uncertainties of methods.

### 1. BEVEZETÉS

A felületi mikrotopográfia jellemzése hagyományosan összefonódott a különböző felületalakító eljárások minősítésével, illetve annak feltérképezésével, hogy az egyes gyártástechnológiai folyamatok milyen jellegű felületeket eredményeznek.

A hagyományos paraméter alapú kiértékeléstechnika korlátai – érzékenység a mintavételi hosszra és a mintavételi lépésközre – számos „alternatív” mikrogeometriai, mikrotopográfiai kiértékelési irányzatot hívtak életre. Napjaink népszerű irányzatai közé tartoznak a különböző korrelációs függvények, a teljesítmény sűrűség spektrum (PSD) vagy a fraktál analízis. Ezen módszerek a felületek olyan jellegzetességeit domborítják ki, melyet a hagyományos technikák rejtve hagynak. Ugyanakkor ezen módszerek gyakorlati alkalmazása számos nyitott kérdést tartogat. Kellő mennyiségű gyakorlati tapasztalat híján használatuk bizonytalanságokat rejt magában.

Jelen munkánk ezen bizonytalanságok feltárását célozza. Vizsgálataink során különböző megmunkálású mikrogeometriák PSD analízisét végeztük el, egyrészt a profilok közvetlen felhasználásával, másrészt a profilok autokorrelációs függvényéből (ACF) származtatva a PSD-t. A vizsgálatokból a felület domináns hullámhosszára és fraktál dimenziójára következtettünk. Alternatív megoldásként a profilok magasságkülönbség korrelációs függvényét használtuk az említett mennyiségek meghatáro-

zására. Célunk annak feltérképezése volt, hogy az egyes módszerek milyen mértékben alkalmassak a felületek hullámhossz és fraktál jellemzésére, milyen előnyök, hátrányok jellemzik azokat.

### 2. A VIZSGÁLT TOPOGRÁFIÁK

Munkánk során ötféle megmunkálású felületek elemzését végeztük el (E=esztergált, K=köszörült; M=mart, G=görgőzött, S=szikraforgácsolt). A gyártási eljárásoknál eltérő átlagos felületi érdességű és egyenetlenség magasságú topográfiaikat választottunk ki. A méréseket 2 µm-es mintavétellel végeztük, 1 mm profilszakaszokon (3-3 profilon minden megmunkálásra). Korábbi vizsgálataink [1] igazolták, hogy a PSD és HDCF technikák sokkal kevésbé érzékenyek a mért profil hosszára, mint a klasszikus technikák, így nem láttuk szükségét a szabványos mérési hosszakon való mintavételnek. A kis mintavételi hosszak különösen topográfiai mérések esetén van jelentősége, ahol nagyobb felületrészek megfelelő felbontású vizsgálata jelentős CPU-idő növekedést okoz. A rövid mintavételi hosszal célunk volt felmérni a felhasznált technikák ilyen szempontú alkalmasságát.

### 3. KIÉRTÉKELÉSTECHNIKA

Műszaki felületek mikrotopográfiájának hullámhossz és fraktál információi számos eljárással meghatározhatók. Jelen munkánkban PSD és HDCF alapú technikákat alkalmaztunk. 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, vagy a jelből származtatott autokorrelációs függvény Fourier transzformáltjával [2]. Az első megközelítés a valós térből átvezet a frekvenciatérbe, megjelenítve a jelben felfedezhető hullámhosszakat. Az

autókorrelációs függvény feltételezi a sztochasztikus jelek stacionárius és ergodikus jellegét. 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.

Egy diszkrét pontokból álló profil autókorrelációja, illetve Fourier transzformáltja rendre az (1) és (2) egyenletek szerint végezhető el.

$$R(r\Delta x) = \frac{1}{M-r} \sum_{i=1}^{M-r} z(x_i)z(x_{i+r}), \quad (1)$$

ahol  $\Delta x$  a mintavételi lépésköz,  $z(x_i)$  az  $x_i$  helyen lévő magasságkoordináta,  $N$  a profil pontjainak száma,  $r$  az eltolás lépésszáma.

$$F(q_p) = \Delta x \sum_{i=1}^M z(x_i) e^{-j2\pi q_p x_i}, \quad (2)$$

ahol  $q_p$  a  $p$ -edik frekvencia.

A transzformáció eredménye két formában jeleníthető meg: egyrészt a hullámhossz függvényében lineáris léptékben, ahol kiugró lokális maximumként megjelennek a profilra jellemző domináns hullámhosszak, másrészt a frekvencia függvényében logaritmikus léptékben, ahol a PSD-re illesztett egyenes meredekségéből meghatározható a felület fraktál dimenziója (részletes leírást ld.: [2, 3, 4]).

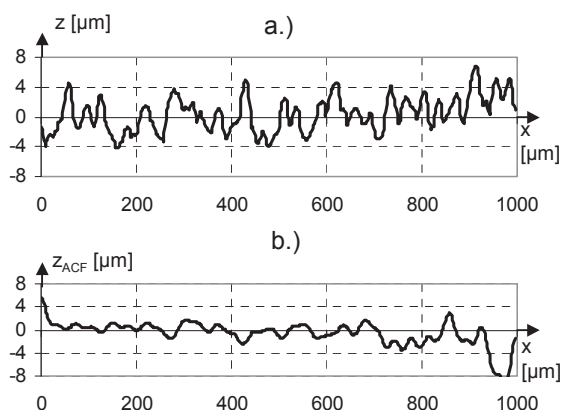
A logaritmikus léptékű PSD görbe a felületek olyan jellegét domborítja ki, melyet a hagyományos technikák rejtve hagynak. A magasság-különbség korreláció ugyancsak a felületnek ezt a jellegét igyekszik megfogni más eszközökkel. Klüppel és társai [5] által gumi súrlódási modellekben használt magasságkülönbség korrelációs függvény a (3) szerint értelmezhető, ahol  $\lambda$  a hullámhossz,  $z(x)$  az  $x$  helyen értelmezett magasságkoordináta,  $z(x+\lambda)$  az  $(x+\lambda)$  helyen értelmezett magasságkoordináta,  $\langle \cdot \rangle$  átlag a teljes  $x$  tartományra.

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

A magasságkülönbség értékeket a hullámhossz logaritmikus léptékű függvényében alkalmazva olyan görbéhez jutunk, melynek lineáris szakasza a felület fraktál dimenziójával, míg a görbén megjelenő töréspont a domináns hullámhosszal van összefüggésben (részleteket ld. [5,6]).

#### 4. EREDMÉNYEK

Az elemzéseket az 1-4. ábrán látható módon végeztük el az összes felületre.



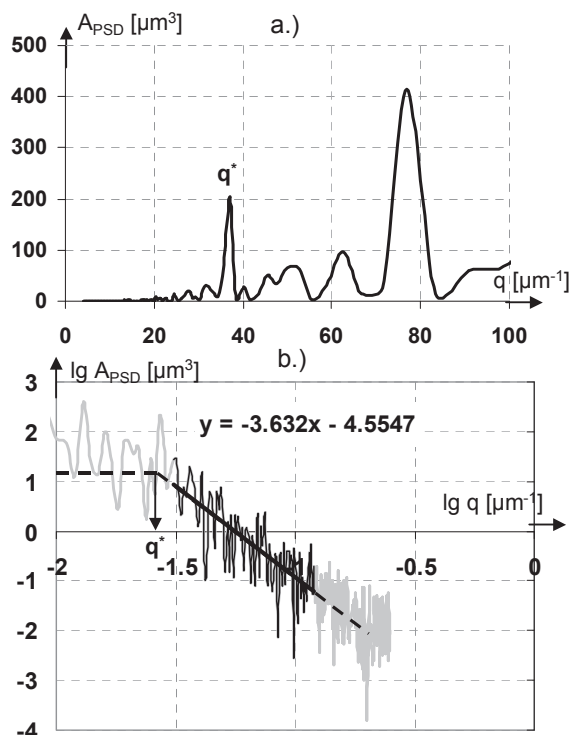
1. ábra. Szikraforgácsolt felület egy profilja (a.) és annak autókorrelációs függvénye (b.)

Az 1a. ábrán látható szikraforgácsolt profil autókorrelációja (1b.) a kezdeti  $5,62 \mu\text{m}$  értékről rendkívül gyorsan csillapodik, ami a jel korrelálatlanságára utal. A periodicitás nem jellemző, a profilelemek változatosak.

A 2a-b. ábrán látható a profil PSD görbéje. Míg a lineáris megjelenítés (2a.) jól kiemeli a domináns frekvenciákat, melyek közül a  $q^*$ -gal jelzett az első, addig a 2b. ábrán a  $q^*$ -hoz tartozó hullámhossznál kisebb összetevők kapnak szerepet: az illeszkedő egyenes meredekségéből számítható a fraktál dimenzió:

$$Df = 4+s/2, \quad (4)$$

ahol  $s$  az illeszkedő egyenes meredeksége.



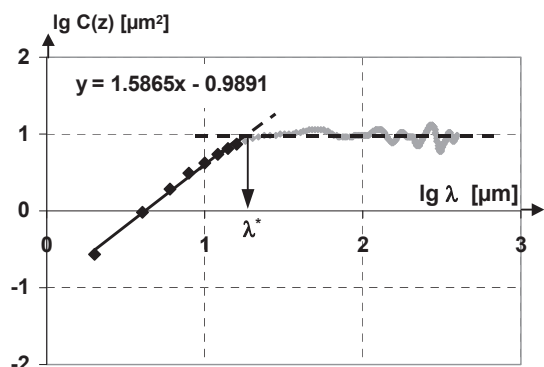
2. ábra. Szikraforgácsolt felület egy profiljának PSD görbéje lineáris (a.) és logaritmikus (b.) léptékben

A 3. ábrán a szikraforgácsolt profil HDCF függvénye látható. Jellegét tekintve hasonló görbét kapunk, mint a profilból számított PSD. Fizikai tartalma is nagyon hasonló. A görbe töréspontja a domináns hullámhosszt ( $Wd$ ), míg meredeksége a fraktál dimenziót ( $Df$ ) adja rendre (5) és (6) szerint.

$$Wd = 2\lambda^* \quad (5)$$

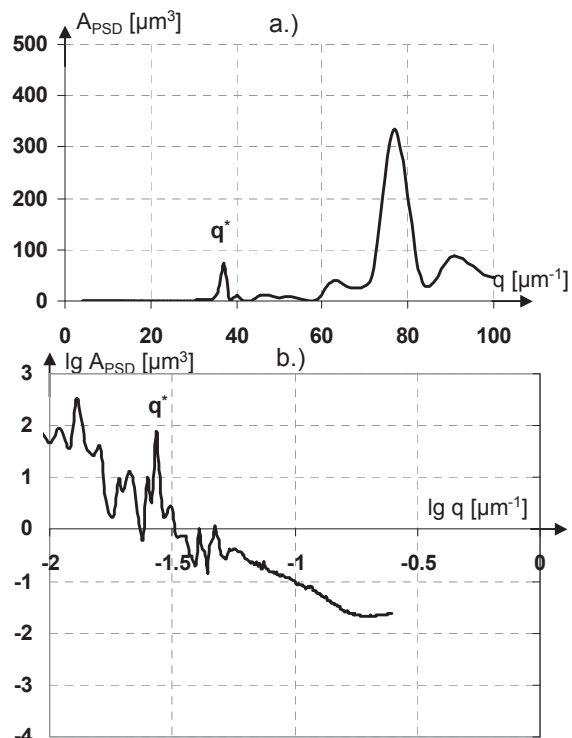
$$Df = (6-m/2)-1, \quad (6)$$

ahol  $m$  az illeszkedő egyenes meredeksége.



3. ábra. Szikraforgácsolt felület HDCF görbéje

A 4. ábra az autókorrelációból származó PSD görbéket mutatja. A 4a. ábra teljes összhangban van a 2a.-val, sőt a két legjellemzőbb hullámhossz még markánsabban megjelenik. A 4b. ábra viszont már nehezen értelmezhető. A  $q^*$ -hoz tartozó töréspont nem jelenik meg, és a magasabb frekvenciáknál sem egyértelmű az egyenes illesztés. Úgy tűnik, hogy miközben az autókorreláció felerősítette a domináns hullámhosszak hatását, addig a felület fraktál jellegét torzította.



4. ábra. Szikraforgácsolt felület profiljának autókorrelációjából származó PSD görbéje lineáris (a.) és logaritmikus (b.) léptékben

A vizsgált felületek esetén az eredményeket (a 3-3 profilból számolt érték átlagát) az 1. táblázat foglalja össze. A fraktáldimenzió értékek kapcsán fontos kiemelni, hogy az ACF+PSD vizsgálatok során számos esetben nem volt értelmezhető eredmény, vagy olyan  $Df$  érték adódott, mely fizikailag nem értelmezhető. Így az ACF+PSD oszlopban szereplő  $Df$  érték esetleg csak 1 vagy 2 profil eredményét foglalja magában. Összességében a 15 profilból 8-ra nem kaptunk használható eredményt.

A  $Df$  eredmények összevetése érdekes eredményt mutat. A kétféle módon meghatározott PSD-ből származó fraktál dimenzió értékek hasonlóságot mutatnak (ld.: K, M, S profilok). Kivételt egyedül az esztergált felület esetén

találunk. Az ACF+PSD alkalmazhatósága és megbízhatósága a korábbi megállapítások miatt meglehetősen gyenge. Bár a kapott PSD görbe kevésbé szór, nagyfrekvenciás torzítása megkérdőjelezi alkalmazhatóságát.

A HDCF analízis rendre jóval kisebb  $D_f$  értékeket ad, mint a PSD. Ráadásul a PSD analízisből azonos  $D_f$  értékekkel rendelkező felületek esetén (E, M) a HDCF-ből származó fraktáldimenzió különböző. Fontos kiemelni ugyanakkor, hogy a HDCF eredmények relatív szórása mindössze 1,9-4,3 % volt. PSD esetén ez az érték 1,4-10,2 %.

Korábbi vizsgálataink [1] rámutattak arra, hogy a PSD-n alapuló fraktál analízis érzékeny a mintavételre, és alkalmazhatósága leginkább azonos mérési paraméterekkel felvett profilok összehasonlítására terjedhet ki. A felület abszolút értelemben vett fraktál dimenziójának megállapítása továbbra sem tűnik megoldott kérdésnek.

1. táblázat. A vizsgált topográfiák domináns hullámhossza és fraktál dimenziója

Mégmunkálás	$D_f$ [-]			$W_d$ [ $\mu$ m]		
	PSD	ACF+PSD	HDCF	PSD	ACF+PSD	HDCF
E	1,54	1,38	1,23	50,3	52,2	52,7
K	1,70	1,77	1,41	36,9	33,5	30,0
M	1,55	1,54	1,32	38,0	45,8	54,0
G	1,85	-	1,33	74,2	58,3	59,3
S	1,22	1,29	1,20	42,9	54,6	49,3

A felületeket jellemző domináns hullámhossz tekintetében a három módszer sokkal egységesebb képet ad. Az esztergált és mart felületek esetén az eredmények értékeléséhez támpontot nyújtanak a mégmunkálás körülményei. Mindkét esetben 50  $\mu$ m-es mégmunkálási távolságú határozott nyomokat várunk a felületen. Az esztergált felület esetén ezt mindhárom technika kellő pontossággal számolja. A mart felület azonban némi eltérést mutat. Az elvárt értéktől a legnagyobb eltérést a profilokra számolt PSD analízis adja. Ugyancsak kiugró értéket ad ez a módszer a görgözött felületnél. Ezek alapján feltételezhetjük, hogy a PSD analízis

esetén előfordulhatnak olyan – a spektrumban megjelenő – domináns hullámhossznak mutatóköző összetevők, melyek úgy torzítják a spektrumot, hogy a felületre jellemző – pl. a mégmunkálás periodicitását kifejező – hullámhossz érték elsikkad.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Vizsgálataink összefoglalásaként megállapíthatjuk az alábbiakat:

- az autókorrelációból származtatott teljesítmény sűrűség spektrum nem alkalmas az adott profil fraktál dimenziójának meghatározására;
- a profilból közvetlenül meghatározott PSD analízisnél megbízhatóbb eredményeket a domináns hullámhosszt illetően az autókorrelációból származtatott spektrum;
- a HDCF függvényből számolt fraktál dimenzió a vizsgált felületek esetén kisebb érték volt, mint a PSD-ből számolt  $D_f$ .

## 7. IRODALOM

- [1] Czifra Á.: Sensitivity of power spectral density (PSD) analysis for measuring conditions, Rudas I. J., Fodor J., Kacprzyk J. (Eds.): Towards Intelligent Engineering and Information Technology, 2009, p. 505-517
- [2] Stout, Sullivan, Dong, Mainsah, Luo, Mathia, Zahouni: The development of methods for characterisation of roughness in three dimensions, Printing Section, University of Birmingham Edgbaston, Birmingham, 1993.
- [3] Czifra, Á.: Felületek hullámhossz összetevőinek vizsgálata, GÉP, LIX évf., 2008/10-11. p. 15-18
- [4] Réti T.: Kvantitatív módszerek a hálós jellegű szövetszerkezet morfológiájának jellemzésére, Kohászat 112/9 (1979)
- [5] 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
- [6] Horváth, S., Czifra, Á.: Új módszerek a felületi érdesség és hullámosság vizsgálatában, OGÉT XVII. Nemzetközi Gépész Találkozó, Gyergyószentmiklós, 2009, pp. 169-173