



ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA

Dr. Horváth Sándor
okleveles gépészmérnök

**A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése,
a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának
vizsgálata és elemzése**

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:
Dr. Sipos Jenő PhD, főiskolai tanár

**Budapest
2008**

" Mérd meg, ami mérhető, ami nem az, tedd mérhetővé!"

(Galileo Galilei)

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS	3
1.1	A TÉMA AKTUALITÁSA	3
1.2	KUTATÁSI CÉLOK ÉS MÓDSZEREK	5
2	A HULLÁMOSSÁG JELENTŐSÉGE	7
2.1	A HULLÁMOSSÁG JELENTŐSÉGE A SZAKIRODALOM ALAPJÁN	7
2.2	A HULLÁMOSSÁG FIGYELMEN KÍVÜL HAGYÁSA, MINT LEHETSÉGES HIBAFORRÁS	9
2.3	ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK	11
3	A HULLÁMOSSÁG KIÉRTÉKELÉSTECHNIKÁJA	12
3.1	A HULLÁMOSSÁG ÉRTELMEZÉSE	12
3.1.1	<i>A különböző rendű eltérések</i>	12
3.1.2	<i>A hullámosság vizsgálatának történeti áttekintése</i>	15
3.1.3	<i>A hullámosság szabványosításának jelenlegi helyzete</i>	17
3.2	A FELÜLETI HULLÁMOSSÁG MÉRÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI	19
3.2.1	<i>Módszerek áttekintése</i>	19
3.2.2	<i>A mérésekhez használt metszertapintós műszer alkalmasságának bemutatása</i>	21
3.2.3	<i>A mintavételi távolság hatása</i>	24
3.2.4	<i>A mérési tartomány megválasztása</i>	26
3.3	A HULLÁMOSSÁG ELVÁLASZTÁSA AZ ALAKHIBÁTÓL ÉS AZ ÉRDESSÉGTŐL	28
3.3.1	<i>A szűrés jelentősége</i>	28
3.3.2	<i>A szűrés lehetőségei 2D-ben</i>	30
3.3.3	<i>A digitális profil szűrők összehasonlítása</i>	43
3.3.4	<i>Egyenetlenségek szétválasztása 3D-ben</i>	44
3.4	A SZABVÁNYOS 2D-S SZŰRÉS ELLENTMONDÁSAI	47
3.4.1	<i>„Ellentmondásos” felületek értékelése</i>	47
3.4.2	<i>Összegzés, javaslatok</i>	50
3.5	A HULLÁMOSSÁG JELLEMZÉSE	51
3.5.1	<i>A hullámosság 2D-s paraméterei</i>	51
3.5.2	<i>A hullámosság 3D-s jellemzése</i>	53
3.5.3	<i>A hullámosság előírása műszaki dokumentációban</i>	60
3.6	ÖSSZEGZÉS	64
4	A HULLÁMOSSÁG ÉS A MŰKÖDÉS KAPCSOLATA	65
4.1	A HULLÁMOSSÁG HATÁSA A MŰKÖDÉSI TULAJDONSÁGOKAT LEÍRÓ JELLEMZŐKRE	65
4.1.1	<i>Felületek generálása</i>	65
4.1.2	<i>A felületi hullámosság hatásának vizsgálata</i>	68
4.1.3	<i>Elemzés, következtetések</i>	70
4.1.4	<i>Összegzés</i>	72
4.2	A HULLÁMOSSÁG ÉS A KOPÁSI FOLYAMAT KAPCSOLATA	73
4.2.1	<i>A kopás kísérleti vizsgálata</i>	73
4.2.2	<i>A koptatóberendezés</i>	74
4.2.3	<i>A hullámosság hatását vizsgáló koptatókísérletek</i>	75
4.2.4	<i>Modellezés a Persson elmélet alapján</i>	77
4.2.5	<i>Következtetések</i>	79

5 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	80
5.1 TÉZISEK	80
5.2 AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI.....	81
IRODALOMJEGYZÉK.....	83
HIVATKOZOTT IRODALOM.....	83
HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK.....	90
A TÉMÁBAN KÉSZÜLT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....	91
A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ POSZTERKIÁLLÍTÁSOK.....	93
SAJÁT PUBLIKÁCIÓRA VALÓ KÜLSŐ HIVATKOZÁSOK.....	93
A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ KUTATÁSI JELENTÉSEK.....	94
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	95
MELLÉKLETEK	98
1. MELLÉKLET: A MIKROGEOMETRIA ÉS MIKROTOPOGRÁFIA HULLÁMOSSÁGI PARAMÉTEREI	99
2. MELLÉKLET: KÜLÖNBÖZŐ HULLÁMOSSÁGGAL VÉGZETT KIÉRTÉKELÉSEK EREDMÉNYEI.....	109

1 BEVEZETÉS

A felületi minőség komplex fogalom, amely a felület rendkívül sok tulajdonságát foglalja magába. Komplexitásának következménye, hogy hatást gyakorol a különböző tudományterületek által kutatott folyamatokra. Így elengedhetetlenül fontos a felület jellemzőinek ismerete, megbízható és pontos mérése, kiértékelése [Wh04]¹. A korszerű mérés technikai és adatfeldolgozó eszközöknek, valamint az utóbbi évtized kutatási eredményeinek köszönhetően lehetővé vált a műszaki felületek mikrogeometriájának sokoldalú jellemzése, továbbá egyre többet sikerült megtudnunk a topográfia és a működés kapcsolatáról is.

A felületi mikrogeometria két alapvető összetevője a kistérközű érdesség és a lényegesen nagyobb hullámhosszú hullámosság. Az érdesség és hullámosság különböző geometriai jellemzőkkel rendelkezik, keletkezésük más és más okokra vezethető vissza, de a felület minőségét, működési tulajdonságait mindkettő befolyásolja. A felület mikrogeometriájának vizsgálatával számos kiváló kutató és kutatócsoport foglalkozik, de egyértelműen megállapítható, hogy a hullámosságról lényegesen kevesebb ismerettel rendelkezünk, mint az érdességről.

A felületi mikrogeometria, illetve topográfia vizsgálatával foglalkozó kutatócsoport tagjaként mintegy két évtizede foglalkozom a felületi hullámossággal. Eddigi eredményeimet a Budapesti Műszaki Egyetemen megvédett egyetemi doktori értekezésben, publikációkban, illetve kutatási (rész)jelentésekben dokumentáltam.

Korábbi eredményeim elsősorban a kétdimenziós (2D-s) értelmezéshez és kiértékeléshez kapcsolódtak. Az 1992-ben megrendezett „*The Newest Developments in Surface Topography*” konferencián kiemelt hangsúlyt kapott a 3D-s technika alkalmazásának szükségessége. Kutatók és ipari szakemberek akkor megfogalmazott véleménye szerint a felületek 3D-ben történő értelmezésével olyan információkhoz juthatunk, melyekről a 2D-s technika nem képes tájékoztatást adni. A 2D-s mérések korlátaira a 90-es években számos kutatás világított rá, megállapítva, hogy a felület teljes jellemzésére, a működési tulajdonságok és a felületi topográfia közötti összefüggések feltárására kizárólag 3D-s vizsgálatokkal van lehetőség.

A mikrotopográfia mélyebb megismerésének lehetősége a hullámosság kutatása előtt is új távlatokat nyitott. Jelen értekezés 2008 első negyedévének végéig elért eredményeimet ismerteti. Munkámmal a hullámossággal kapcsolatos egyes fontos kérdésekre kívántam választ adni. Ezek megfogalmazása során értelemszerűen újabb kérdések vetődtek fel, újabb kutatási célok fogalmazódtak meg. Reményeim szerint eredményeim a gyakorlati hasznosíthatóságon túl a hullámosság további kutatásához is alapot nyújtanak.

1.1 A téma aktualitása

Több kutató és számos kiváló szakember foglalkozik a tribológiával, ami a legegyszerűbb definíció szerint a súrlódás, a kopás és a kenés tudománya [Bl01, Bu01, Th98, Pa83].

A tribológiai rendszerek tanulmányozása mögött ma már komoly gazdasági szempontok húzódnak meg. A tribológia gyakorlati jelentőségét jellemzi, hogy a világ energiatermelésének csaknem harmadát a súrlódási veszteség emészti fel. Az ASME² tanulmánya szerint a súrlódás és kopás okozta veszteség az Egyesült Államokban eléri a GDP 2%-át. Korábbi németországi gazdasági jelentések ezt 4%-ra becsülik [Ga87]. Valószínűsíthető, hogy hazánkban ez az arány még rosszabb. A 2001 évi II. Tribológiai Világ Kongresszuson Peter Jost nyitóbeszédében a tribológia fejlesztésére fordított összegének és az így elért megtakarításnak arányát 1:50-re becsülte, ami kiemelkedően magasnak számít más tudományágakhoz viszonyítva.

¹ A hivatkozott irodalom azonosítására a szerző/szerzők vezetéknevének/neveinek első két betűjéből, valamint a megjelenés dátumának utolsó két számjegyéből álló karaktersort használtam.

² American Society of Mechanical Engineers

A tribológiai kutatások eredményei értelemszerűen fontos szerepet tölthetnek be a honvédségnél működő technikai eszközök esetében. Ezek figyelembevétele a tervezés, gyártás és üzemfenntartás során a gyakran szélsőséges környezeti viszonyok között üzemelő harcjárművek, fegyverek és egyéb műszaki eszközök üzemidejének meghosszabbítását, megbízhatóságának növekedését eredményezhetik.

A közvetlen gazdasági hasznon túl napjaink tribológiai kutatásai környezetkímélő, újra hasznosítható súrlódó szerkezetek előállítását és ezen keresztül a környezeti károk csökkentését is lehetővé teszik.

A tribológiai jelenségek rendkívül összetettek, és a terhelés alatt elmozduló felületek minőségét is komplex fogalomként kell értelmeznünk, amely magába foglalja a felületi mikrogeometria eltéréseit, ezen belül az érdességet és a hullámosságot, valamint a felületi réteg fizikai, kémiai állapotát, így a megmunkálás során létrejövő képlékeny alakváltozást, a felületi réteg keménységét, a maradó feszültséget, a szövetszerkezetet és a vegyi összetételt [PaVáBe03].

A működést meghatározó összetevők egyike az érintkező felületek geometriája. Egy technikai felület topográfiájának elméletileg tökéletes jellemzése valós körülmények között nem lehetséges, de az intenzív kutatások eredményeképpen jórészt rendelkezésre állnak azok a módszerek és eszközök, melyek a lehetővé teszik a topográfia leírását. Ugyanakkor az ipari gyakorlat a felület vizsgálatánál még ma is szinte csak az Ra, Rz, Rt – magassági eltéréseket jellemző – érdességi paramétereket alkalmazza, a hullámosság jellemző paramétereinek előírásával nagyon ritkán találkozhatunk. Egy 1999-ben készült, 18 ország 284 vállalatánál végzett elemzés [Ch99] szerint a 63 ISO³ paraméter közül 43 a cégek kevesebb mint 5%-ánál fordul elő. 92%-a használja az Ra, 49%-a az Rz és 40%-a az Rt érdességi paramétereket. 13% csak az Ra átlagos érdességet használja, a P és W profil jellemzésére – szinte kizárólag a Pt és a Wt hullámosság magasságra korlátozódóan – csak elvétve kerül sor.

Az egyik legjelentősebb hazai autóiipari alkatrészeket gyártó vállalat mintegy 800 forgácsolt gyártmányának rajzain topográfiai előírás egyáltalán nem szerepel, az előírások túlnyomó többsége az R érdességi profilból vagy a szüretlen P profilból származtatott 2D-s paraméter. A hullámossággal kapcsolatos paraméter (Wt) és a hordfelület görbéből számítható paraméter előírásával a 2008-ban elvégzett vizsgálat során csupán egy-egy esetben találkoztam. (A gyártó rendelkezésére álló műszerek egyébként 120 profil- (2D-s) és 40 mikrotopográfiai (3D-s) jellemző meghatározására lennének alkalmasak.) Mivel a szóbanforgó vállalat számos európai és tengeren túli autógyártó beszállítója, az áttekintés nem csak hazai viszonylatban tekinthető reprezentatívnak.

Ha azt is figyelembe vesszük, hogy a kutatók által kidolgozott, még nem szabványosított mikrogeometriai és mikrotopográfiai jellemzők száma több százra tehető, megállapíthatjuk, hogy az ipari gyakorlat ma még konstrukciós és technológiai vonatkoztatásban sem használja ki megfelelő mértékben az ide vonatkozó tudományos eredményeket, és ez a megállapítás kiemelten igaz a hullámossággal kapcsolatban.

A fegyverek, lövőkészülékek, valamint ezek lőszerének vizsgálatát szabályozó jogszabály [31/2006.(VI.1.) GKM rendelet] például a hátultöltő új fegyverek löpróbat megelőző egyedi vizsgálatánál az átlagos érdesség határértékeit előírja (a tölténygyűrűben $Ra \leq 1,8 \mu m$, a csőben $Ra \leq 1,0 \mu m$), de a mikrogeometriai értelemben vett hullámosságra vonatkozó előírást nem tartalmaz.

Azt, hogy a felületi hullámosság előírását és vizsgálatát az ipari gyakorlat általánosan mellőzhetőnek tekinti, jelzi az is, hogy a felületi mikrogeometria vagy topográfia vizsgálatát a szaknyelv általánosan „érdességmérés”-nek nevezi.

Ma már nyilvánvaló, hogy a fokozott minőségi elvárások mellett fontos ismerni és a kiértékelésben használni a felületi mikrogeometria (2D) és a mikrotopográfia (3D) más paramétereit is és azt, hogy ezen paraméterek értékei milyen felület-jellegre, megmunkálási módra, eltérésre, illetve, milyen kopási, súrlódási, korrózióállósági, vagy éppen kenőanyag-megtartási viselkedésre

³ International Organization for Standardization

utalnak. A felületi érdességi paraméterek 2D-s és 3D-s értelmezésével, kiértékelésével [PaKo98, PaCzKo02, Cz02, FaHo05, FaCzPaHo05], valamint az érdesség működésre gyakorolt hatásával [Ba00, Né01, Cz07, Ba07] számos kutatás foglalkozott és foglalkozik, hazai és nemzetközi viszonylatban is kiemelkedők a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen és a Budapesti Műszaki Főiskolán folyó kutatások.

A felületi hullámosság vonatkozásában sor került a 2D-s paraméterek rendszerezésére, mérési lehetőségeinek áttekintésére, a paraméterek információtartalmának elemzésére [FaCzPaHo05, PaHo91–2, Ho92, HoPa92], de a hullámossággal kapcsolatban az utóbbi 1–2 évtized kutatási eredményeit és az azok alapján kidolgozott új nemzetközi szabványok előírásait összefoglaló publikáció nem jelent meg.

Stout és társai a 3D-s kiértékeléstechnikát megalapozó munkájukban [StSuDo93] értelmezték a 3D-s felület érdességét, valamint hullámosságát, bemutattak olyan szűrési módszereket, melyek segítségével az érdességi és hullámossági felület is meghatározható, definiálták az amplitúdó, térközi, hibrid és működési tulajdonságokat jellemző 3D-s paramétereket. Munkájuk és az az alapján 1994-ben kiadott EUR 15174 EN európai ajánlás megjelenését követően a szakirodalomban a felületi érdesség 3D-s jellemzése nagyon nagy hangsúlyt kapott, de a hullámosság vonatkozásában 3D-s kiértékeléssel tudományos publikációkban sem nagyon lehet találkozni.

Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálati eredményeit bemutató dolgozatomban [Ho90] rámutattam a hullámosság és a működési tulajdonságok közti kapcsolat feltárásának szükségességére, és a 2. fejezetben ismertetésre kerülő szakirodalmi utalások is hangsúlyozzák a hullámosság ilyen értelmű vizsgálatának fontosságát.

A téma aktualitását alátámasztják az elmúlt évtizedben kiadott új szabványok is, amelyek a műszaki felületek mérésével és jellemzésével kapcsolatban számos meglévő problémát megoldottak ugyan, de új kérdéseket és ellentmondásokat is felvetettek.

1.2 Kutatási célok és módszerek

A fentiekben leírtakkal összhangban az alábbi kutatási célokat fogalmaztam meg:

1. A hazai és nemzetközi szakirodalom áttekintése és saját mérések alapján a hullámosság jelentőségének bemutatása.
2. A hullámosság-kiértékeléstechnika jelenlegi helyzetének feldolgozása, elemzése, a megoldatlan vagy ellentmondásos kérdések feltárása az alábbi részletezés szerint:
 - A hullámosság és az érdesség szétválasztásának problematikája, korszerű szűrési módszerek, fejlődési tendenciák.
 - A felületi hullámosság szabványos és meghatározó ágazatokban használt speciális 2D-s paraméterei.
 - 3D-s felületvizsgálati technikák legújabb alapelvei, kiértékelési módszerei, 3D-s topográfiai paraméterkészlet osztályozása és matematikai modelljei.
3. A hullámosság egyértelmű jellemzését biztosító kiértékeléstechnikai javaslatok saját méréseken alapuló kidolgozása.
4. A felületi hullámosság és a működés kapcsolatának vizsgálata az alábbi két területen:
 - A működési tulajdonságokat jellemző mikrotopográfiai paraméterekre gyakorolt hatás vizsgálata és elemzése.
 - A hullámosság és a sűrűlódás összefüggésének vizsgálata kísérleti úton és analitikus modell alkalmazásával.

Annak érdekében, hogy a felület hullámosság-komponensének a működési tulajdonságokat leíró mikrotopográfiai paraméterekre gyakorolt hatását tág határok közt lehessen elemezni, szükségesnek láttam egy új vizsgálati módszer kidolgozását is.

Összességében a hullámosság fontosságát, kiértékeléstechnikáját és a működésre gyakorolt konkrét hatásokat bemutató dolgozat elkészítését tűztem ki célul, amely hozzájárul az értelmezéssel, kiértékeléssel kapcsolatos hiányosságok és ellentmondások megszüntetéséhez, a kiértékeléstechnika és a működés vonatkozásában is új tudományos eredményeket szolgáltat, továbbá alapot ad a felületi hullámossághoz kapcsolódó további kutatások folytatásához.

Munkámmal hozzá kívántam járulni ahhoz, hogy a felületi hullámosság a tervezés, gyártás és minőségvizsgálat során az ipari gyakorlatban – beleértve a Magyar Honvédség technikai eszközeinek tervezését, gyártását és üzemfenntartását is – a jelenleginél nagyobb hangsúlyt kapjon.

A kutatás során feldolgoztam a kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalmat, elért eredményeimet az irodalomjegyzékben részletezett publikációkban ismertettem.

A kutatás során a felületek elemzése a Budapesti Műszaki Főiskola Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán (BMF-BGK) üzemelő műszerek segítségével, kétféle módszerrel történt. Elsősorban a metszetalapintós elven működő Mahr Perthen Concept típusú 3D-s érdességmérő készüléken 2D- s és 3D-s vizsgálatokat végeztem, esetenként pedig a JEOL JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkóp segítségével vizsgáltam a felületeket.

A mikrogeometria, illetve topográfia kiértékeléséhez felhasználtam az érdességmérő berendezés saját szoftverét, az általam kifejlesztett, a hullámosság középvonalas- és motív paramétereinek meghatározására alkalmas szoftvereket [Ho90], a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszéke és a BMF-BGK együttműködésében, közreműködéssel is kidolgozott Surf3D szoftvert, a BMF kutatói⁴ által kifejlesztett PSD kiértékelő programot, valamint a National Institute of Standards and Technology (NIST) keretein belül Bui és társai [BuReVo04] által kifejlesztett, szabadon felhasználható, internet alapú szoftvert [wSy05].

A felületi textúra hullámosságának hatását a működés meghatározó topográfiai paraméterekre matematikai úton létrehozott hullámossági felületekkel vizsgáltam, melyekre valós felületek érdességi topográfiáját szuperponáltam. Ilyen módon nagyszámú és jól kézbentARTHató hossz és amplitúdó irányú hullámossági jellemzőkkel bíró felületek vizsgálatára, továbbá az adott körülmények között érvényes következtetések levonására nyílt lehetőség. A generált felület pontjainak előállításához programozási eszközként Visual Basic-ot használtam, az előállított pontok és a ráillesztett felület megjelenítésére a Rhinoceros NURBS⁵ modellező szoftver bizonyult a legmegfelelőbbnek.

A felületi hullámosság és a kopási folyamat egymásra hatását laboratóriumi körülmények között elvégzett koptatókísérleteken keresztül vizsgáltam. A kísérletekhez használt „Friction Wearing Tester” berendezés a BMF-BGK és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszékének közös fejlesztése, amely olyan tribológiai vizsgálatok elvégzését biztosítja, ahol a működési viselkedés mélyebb feltárása érdekében számos paraméter (terhelés, sebesség, lökethossz, súrlódó erő, hőmérséklet) változását rögzíthetjük, követhetjük a kopási-felületváltozási folyamatot. Koptatókísérleteimben, eltérő kezdeti megmunkálással, acél-ferrodo anyagpár száraz súrlódását vizsgáltam, folyamatosan figyelve az anyagpár súrlódási viselkedését. A kopási folyamat során nyomon követtem a mikrotopográfia alakulását.

Analitikus modellel elemeztem a valós érintkezési tartomány nagyságát, ennek ismeretében információkat szereztem a hullámosság súrlódási tényezőre gyakorolt hatásáról.

⁴ Czifra Árpád, Goda Tibor

⁵ Non Uniform Rational B-Spline (nem egyenközű racionális B-szplajn)

2 A HULLÁMOSSÁG JELENTŐSÉGE

2.1 A hullámosság jelentősége a szakirodalom alapján

A felületi hullámosság-mérés történelmi fejlődése folyamán elsősorban a gyártástechnológiához kapcsolódott. Napjainkban is a folyamat-felügyelet és diagnosztika jelenti elsődleges alkalmazási területét. Ez kézenfekvő amiatt, hogy a szűréssel a különböző okokra visszavezethető geometriai eltéréseket választjuk szét érdekességgé és hullámosságá, illetve alakhibává. Ily módon az érdekesség illetve a hullámosság vizsgálatával magukra a „technológiai” folyamatokra irányítjuk figyelmünket. Ugyanakkor megállapítható, hogy a modern tribológia egyre nagyobb szerepet tulajdonít a hullámosságának a kapcsolódó felületek működési tulajdonságainak vizsgálatánál.

Az alábbiakban a szakirodalom – a teljesség igénye nélküli – áttekintésével betekintést szeretnék nyújtani abba a széles spektrumba, melyben a hullámosság jelentőséggel bír.

Raja és társai [RaMuFu02] a hullámosság jelentőségét elsősorban folyamat-felügyeleti és diagnosztikai eszközként határozzák meg, de döntő fontosságot tulajdonítanak az azonos módon történő szűrésnek is a működő felületek vizsgálata során. Az így kapott érdekességi és hullámossági jellemzők összevetésével a kapcsolódó felületeken végbemenő folyamatok összehasonlíthatókká válnak.

A szerszámdiagnosztika előszeretettel alkalmazza a hullámosság vizsgálatát az egyes eljárások, szerszámok minősítésére. 2D-s hullámossági jellemzőket használnak Souza és társai [SoSaSa05] nagysebességű homlokmarás szerszámanyagainak minősítésére. Bodschwinn és Seewig szerint [BoSe96] a szerszámkopás okozta lengések hullámosság kialakulásához vezetnek.

Lengyel kutatók köszörűkorongok vizsgálata esetén használják a 2D-s hullámossági paramétereket (W_t , W_a) a köszörűkorong minősítésére [GoKo05]. Találunk példát vízszaggárral való megmunkálás esetén is a felületi hullámosság (W_t) elemzésére [ShFoPa05] a technológia minősítéséhez, de kémiai polírozás esetén is az átlagos hullámosság értéke (W_a) ad tájékoztatást a zagy összetételéről [LiHuHo05].

Ugyancsak gyártástechnológiai területen, de nem anyagválasztó, hanem agyagfelrakó technológiák esetében találkozunk a felületi hullámosság vizsgálatával. Trifa és társai [TrMoCo05] plazmaszórással felrakott felület hullámosságának vizsgálatával (W_p) elemzik a technológiai folyamatot, mert a kialakuló felület hullámossága összefüggésben áll a szórás egyenletességével.

Lemezek festése esetén döntően a felület hullámossága határozza meg a végtermék esztétikai minőségét [CIVe04]. Hasonló következtetésre jutott Staeves is, aki lemezek topográfiájának vizsgálata során megállapítja, hogy a lemezek felületi hullámossága a mélyhúzás tribológiai viszonyait kevésbé befolyásolja mint az érdekesség, ugyanakkor meghatározó a lakkozás minősége szempontjából, ami az autóiparban rendkívül fontos szempont [St98].

A gyártástechnológiai példák mellett több szakirodalmi utalást is találunk, amelyek a működés és a felületi hullámosság kapcsolatát vizsgálják.

Számos kutató [HaSaPr04], [JaJe04], [LyRaEb00] foglalkozik gördülőcsapágyak rezgéseinek vizsgálatával. A csapágyakban keletkező rezgést és zajt modellező analitikus megoldásokban rendre a felület hullámossága áll a középpontban, bár a kidolgozott modellek nem a valós felületi hullámosságot elemzik, hanem matematikai függvényekkel helyettesítik azt.

Más kutatók áramlások vizsgálatánál elemzi a felület hullámosságát a határréteg-örvényréteg átmenet megállapításához [wMa96], [WiMa98].

A hidrodinamikus kenélmélet a Reynolds egyenletben szereplő „h” részfüggvény megalkotásánál a (2.1) összefüggés szerint veszi figyelembe az érdekességet és a hullámosságot [Wh94]. (A 2.1. összefüggés a Reynolds egyenlet leegyszerűsített formája.)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{12\eta} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{h}{2} U_1 \right] = 0, \quad (2.1)$$

ahol $h = h_s + h_r$,
 h_s az alakot leíró függvény,
 h_r az érdesség függvény.

Súrlódó felületek érintkezésével kapcsolatban Kozma [Ko94] utal a hullámosság szerepére. Kifejti, hogy a felületek hullámossága miatt csak a kiemelkedő hullámtetőkön lévő érdesség csúcsok vesznek részt a tényleges érintkezési felület kialakulásában. Blau a súrlódási tényező jelentőségét és hatását elemző munkájában [Bl01] a felületi hullámosságot ugyancsak a súrlódási tényezőt befolyásoló paraméterként említi.

Widder kísérleti eredményei szerint statikus tömítések esetében a felületi hullámosság lényegesen nagyobb mértékben befolyásolja a tömítési veszteséget, mint a felületi érdesség [Wi04].

Rasheed [Ra98] az axiális és kombinált (axiális, tangenciális) elméleti hullámosság hatását vizsgálja a hidrodinamikus siklócsapágy teherviselési és súrlódási tulajdonságaira, és megállapítja, hogy a hullámosság teherbírási gyakorolt hatásának feltárása további kutatásokat igényel.

Autógyártók tapasztalatai alapján a motor és a hajtáslánc elemeinek tömítési-, kopási- és zajkeltési tulajdonságaira jelentős hatást gyakorol a felület periódikus jellegű, ún. domináns hullámossága [wMa07].

Az EN ISO 12085 B melléklete tájékoztatást ad a motív paraméterek és a működés kapcsolatáról. Szerinte az egyes hullámossági motív paraméterek jelentősen befolyásolják a száraz súrlódást (W_x paraméter), a gördülést (W_x paraméter), továbbá a mozgó tömítések (W_x paraméter), statikus tömítések (W_{te} paraméter) és a forgácsoló szerszámok (W és AW paraméterek a vágóélen) működését. Hasonló összefüggéseket tükröz a Renault tapasztalatai alapján készült összeállítás [ChLoTr00], valamint a Peugeot-Citroen házi szabványa [GE40-087G].

A gyártáson és a működésen túl a tönkremeneteli folyamatok elemzése során is találkozunk a felületi hullámossággal. [BrTeYo98] és [ChKoJe02] kopási folyamatok esetén vizsgálják a felület hullámosságát egyrészt a kopadék mennyiségének megállapítására, másrészt a kopadékképződés és a kopási viselkedés tanulmányozására.

A fenti példákból kitűnik, hogy a felületi hullámosságot ipari és tudományos területen is széles körben alkalmazzák vizsgálati, diagnosztikai módszerként, illetve hogy a hullámossággal számos működési tényező áll összefüggésben. Utóbbihoz kapcsolódóan viszont az is kijelenthető, hogy a fontos megállapításokat kevésbé követték részletes elemző vizsgálatok.

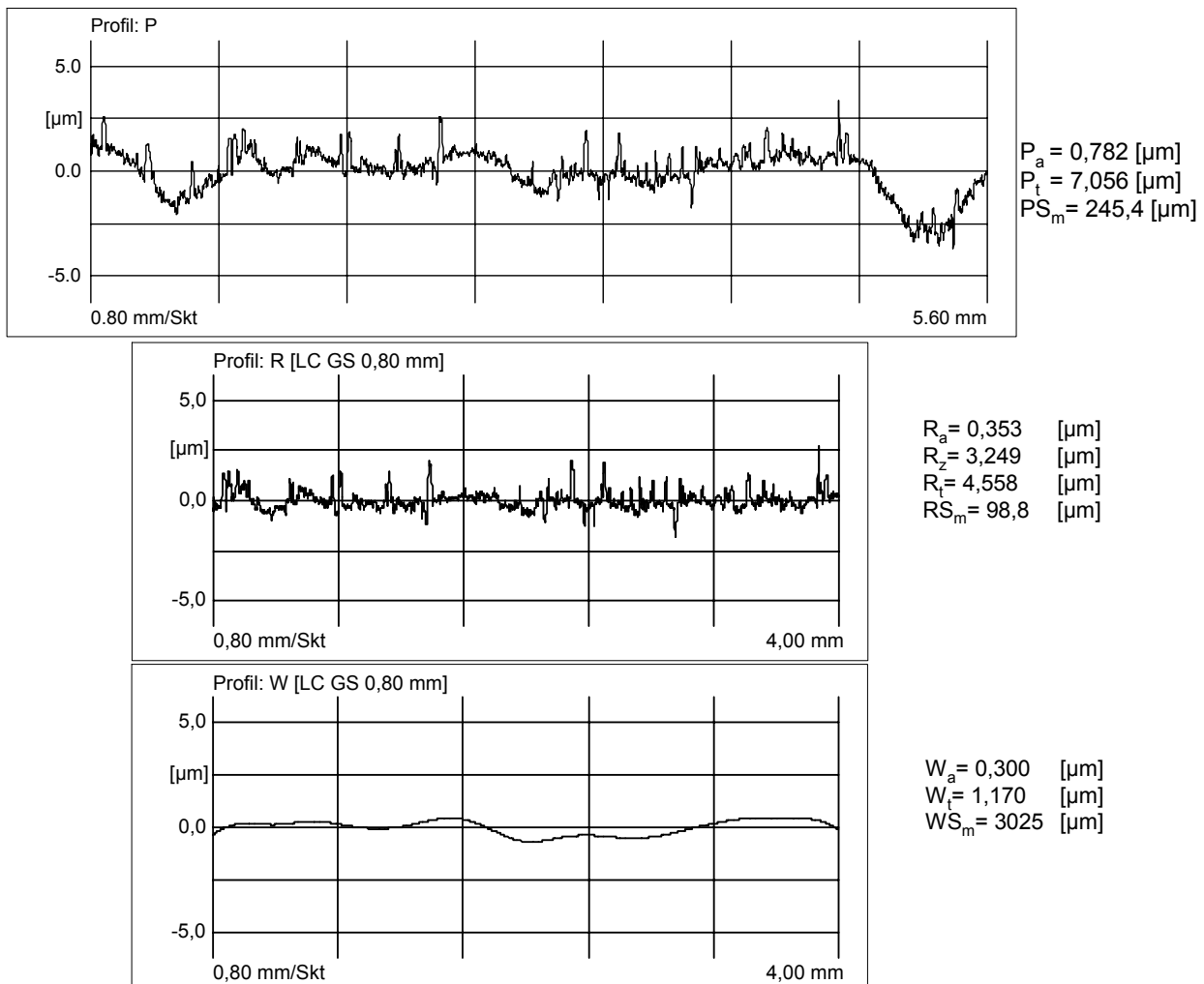
A súrlódó gépalkatrészek és az azzal kapcsolatos problémák **katonai jelentőségét** igazolja az Amerikai Egyesült Államok hadserege számára készített összefoglaló munka [DE99], ami a tribológiai alapfogalmak mellett elsősorban a kenési alapismeretek és a széles körben használt kenőanyagok ismertetésére koncentrálnak. Az USACE⁶ által 1999-ben készített tanulmány 2006-ban és 2007-ben további fejezetekkel bővült. A civil és hadseregen belül dolgozó mérnökökből, tudósokból álló szervezet egyik fő tevékenységként tervezési feladatokat végez, többek között a hadsereg, a légierő és a különböző ügynökségek számára. Ez a tanulmány is kiemeli a felületi hullámosság és érdesség által meghatározott valós és a névleges érintkezési tartomány közötti különbség tribológiai jelentőségét.

⁶ The United States Army Corps of Engineers

2.2 A hullámosság figyelmen kívül hagyása, mint lehetséges hibaforrás

Szerzőtársammal közös korábbi publikációban már rámutattam arra, hogy a gépalkatrészek felületi hullámosságának a működési tulajdonságra gyakorolt hatását a mérnöki gyakorlatban sokszor figyelmen kívül hagyjuk, és ez súlyos működési hibák forrása lehet [HoCz06–3].

A 2.1. ábra egy siklócsapágy persely mérési jegyzőkönyvét mutatja. A P profil, mely a mért profil középvonalra rendezett képe, a működést befolyásoló hullámosságot és érdességet egyaránt tartalmazza. Az érdességi (R) és hullámossági (W) profil alakjukat tekintve ugyan jelentősen különböznek, de magasság irányú méreteik nagysága összevethető, akár csak az átlagos érdességet és hullámosságot jellemző R_a és W_a paraméterek. Ahogy erre az 1.1. pontban rámutattam, műszaki dokumentációinkban egy-egy felületre legtöbbször csak az átlagos érdesség, esetleg az egyenetlenség magasság értékeit írjuk elő. A valóságban azonban az érdesség és hullámosság egymásra szuperponálódik, és az így nyert felület működik. A hullámosság és érdesség szétválasztása a gyártástechnológiai folyamat fontos diagnosztikai eszköze lehet, de a működéshelyes tervezés megköveteli, hogy ne csupán az érdességre, hanem a felület hullámosságára vonatkozóan is előírásokat tegyünk.



2.1. ábra. Vezérműtengely siklócsapágy persely felületének mérési jegyzőkönyve: az érdességi és hullámossági profil, valamint néhány jellemző paraméter

A hullámosság siklócsapágyak működési tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálatával a szakirodalomban találkozhatunk ugyan (pl. [Ra98]), de a hidrodinamikusan csapágyak méretezését tárgyaló szakkönyvek a hullámosságot általában figyelmen kívül hagyják, és a mikrogeometriai eltérések közül csak a tengely-, illetve persely felületének érdekességét veszik figyelembe.

A leggyakrabban használt szakkönyvekben a hidrosztatikus csapágyak részmeretére vonatkozó összefüggések a hullámossággal nem számolnak:

Niemann [Ni81] a minimális részmeret meghatározását az alaktúréstól és a maximális egyenetlenség magasságtól (R_t) teszi függővé.

Vörös [Vö61] és Döbröczöni [Dö99] ajánlása szerint a minimális részmeret $h_0 \geq 4,5(R_{ac} + R_{ap})$, ahol R_{ac} a csap, R_{ap} a persely átlagos érdessége. [Vö61] szerint a részmeret kiszámításához a lehajlást is figyelembe kell venni.

Kozma által közölt összefüggés [Ko07] súlyozottan veszi figyelembe a tengely és a persely érdességét, és figyelembe veszi a tengely lehajlását is. Eszerint a radiális siklócsapágyak minimális kenőfilmvastagsága:

$$h_0 = (2 \div 2,5)(1,5R_{zt} + 0,5R_{zp} + f),$$

ahol R_{zt} a tengely, R_{zp} a persely egyenetlenség magassága, f pedig a tengely perselyen belüli lehajlása.

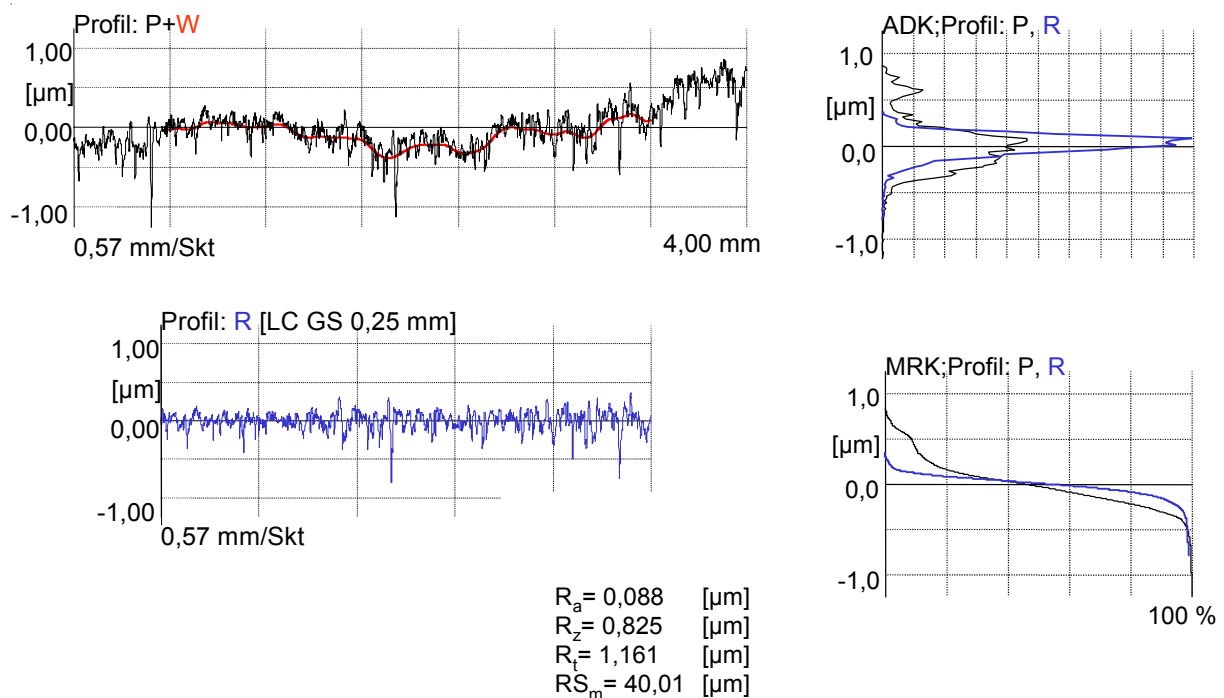
Kivételt jelent Muhs és szerzőtársainak [MuWiJa05] méretezési javaslata. Eszerint a minimális részmeret a tengely és a persely hullámosság magasságának (W_t) valamint egyenetlenség magasságának (R_z) összege.

A hullámosság működésben betöltött szerepének további alátámasztására szolgál a 2.2. ábra, mely egy harckocsiba beépített tengelykapcsoló tárcsa működő felületén mért profil szűretlen és szűrt érdességi képét mutatja a hozzájuk tartozó magasság-eloszlási (ADK^7) és hordozófelületi (MRK^8) görbékkel. Jelentős különbség figyelhető meg a hullámosságot magába foglaló P, illetve a hullámosság kiszűrése után kapott R profilhoz tartozó görbék között. Több kutató is a hordozófelületi görbét veszi alapul a felület érintkezési viszonyainak feltárásához [CoPaPe99, SeBjAn02], a görbe lineáris szakaszának meredekségét összefüggésbe hozva a felület teherviselő képességével.

Jól látható, hogy a hullámosság figyelmen kívül hagyása jelentős hibát okoz. Az R profilból származtatott meredekség $0,005 \mu\text{m}/\%$, míg a P profilból származtatva $0,0125 \mu\text{m}/\%$. A hullámosság figyelmen kívül hagyásával tehát a működési tulajdonságokra vonatkozó következtetéseink tévesek lehetnek.

⁷ A Mahr Perthen Concept műszer jelölése (Amplitudendichte-Kurve)

⁸ A Mahr Perthen Concept műszer jelölése (Materialanteil-Kurve)



2.2. ábra. Kopott tengelykapcsoló tárcsa mért profiljai, magasságeloszlási és hordozófelületi görbéje és mért paramétere

2.3 Összegzés, következtetések

A fejezet a felület hullámosságának jelentőségét ismerteti, és rávilágít arra, milyen hibákhoz vezethet a hullámosság figyelmen kívül hagyása.

A szakirodalmi elemzésből megállapítható, hogy a hullámosságnak komoly szerepe van a technológiai folyamatok minősítésében, mert az adott gyártmány felületi hullámosságából a gyártási folyamatra következtetések vonhatók le.

A szakirodalom szerint a hullámosság számos esetben befolyásolja a terhelés alatt elmozduló gépalkatrészek működését, például siklócsapágyak, vezetékek, fegyverzárok, gördülőcsapágyak, statikus tömítések esetében. A hullámosság működésre gyakorolt hatásának fontosságát saját mérésekkel, köztük egy harckocsiba épített tengelykapcsoló tárcsa működő felületének elemzésével is alátámasztottam. A hullámosság nélküli szűrt profil és a hullámosságot is tartalmazó, valós P profil hordfelület görbéinek kiértékelésével igazoltam, hogy a hullámosság befolyásolja a működési tulajdonságokat.

A gyártáson és a működésen túl a tönkremeneteli folyamatok elemzése során is információt nyújthat a hullámosság kiértékelése.

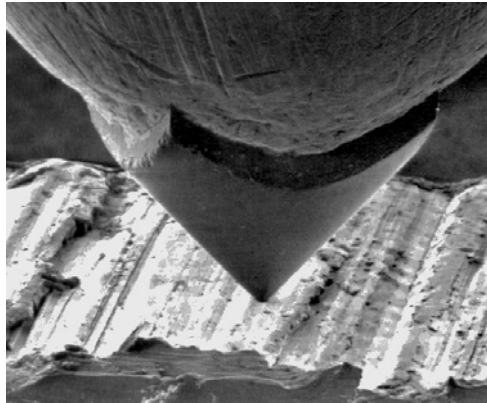
Ahhoz viszont, hogy a hullámosság a gyártásfelügyelet és diagnosztika, a működési tulajdonságok tervezése, valamint a tönkremeneteli folyamatok elemzése területén is jól használható eszköz legyen, feltétlenül szükséges az értelmezéssel és kiértékeléstechnikával kapcsolatos nyitott kérdések megoldása.

3 A HULLÁMOSSÁG KIÉRTÉKELÉSTECHNIKÁJA

3.1 A hullámosság értelmezése

3.1.1 A különböző rendű eltérések

A valós felületeknek az ideális geometriától való eltérése különböző okokra vezethető vissza, az eltérések összetettek, egyértelműen nem leírhatóak. A 3.1. ábrán bemutatott mikroszkópikus felvétel jól érzékelteti a valós felület geometriai bonyolultságát.

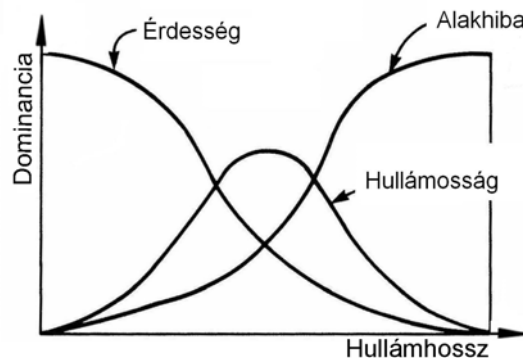


3.1. ábra. Valós megmunkált felület és a tapintócsúcs képe [Sa89]

Az elfogadott gyakorlat szerint a valós felületnek az ideális geometriától való eltéréseit azok formája, illetve keletkezési oka alapján különítjük el egymástól. A nemzetközi szakirodalomban az alábbi vélemények fogalmazódnak meg:

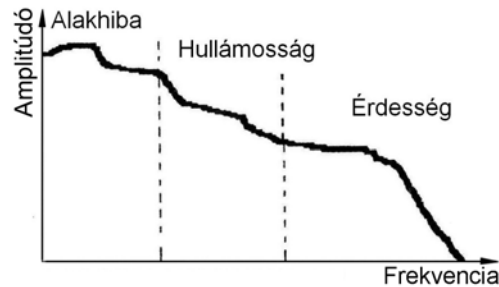
Bhusan [Bu01] a felületi textúrát érdességre, ezen belül nano- és mikroérdességre, hullámosságra (makroérdességre), valamint barázdákra és repedésekre osztja. Érdességként a kis hullámhosszú, a gyártási folyamat jellemző paramétereire visszavezethető eltéréseket értelmezi. Bhusan szerint a hullámosság a gép és munkadarab rezgéseire, rugalmas deformációira, valamint a hőkezelés és vetemedés okozta nagyobb hullámhosszú eltérésekre vezethető vissza.

Whitehouse [Wh94], akárcsak Stout és társai [StSuDo93] a felület egyenetlenségeit formai eltérésekre, hullámosságra és érdességre osztja hullámhosszuk alapján, de ezek szétválasztását korántsem tekinti egyértelműnek. Ugyanis az eltérő okokból keletkező geometriai egyenetlenségek hullámhossza igen széles skálán mozog, és a legtöbb – úgy az érdesség, mint a hullámosság vagy az alakhiba – kiterjed a teljes hullámhossz spektrumra (3.2. ábra). Mindössze azt mondhatjuk, hogy bizonyos hullámhossz tartományokban az egyik vagy a másik hatás a dominánsabb.



3.2. ábra. Az érdesség, a hullámosság és az alakhiba hullámhossz függése [Wh94]

Thomas [Th98] a DIN 4760/1982-es szabványra hivatkozva hullámosságként értelmezi a felületek azon geometriai eltéréseit, ahol a hullámhossz/amplitúdó viszony 1000:1 és 100:1 érték közé esik. A különböző rendű egyenetlenségek amplitúdója és frekvenciája közti kapcsolatot a 3.3. ábra mutatja.



3.3. ábra. Felületi egyenetlenségek amplitúdójának és frekvenciájának kapcsolata [Th98]

A Thomas által hivatkozott DIN szabvány a felületi eltéréseket geometriájuk és keletkezési okaik alapján hat csoportra osztja, és 1–6. rendű egyenetlenségként definiálja. A DIN 4760 szerinti jellegzetes eltéréseket és keletkezésük leggyakoribb okait a 3.1. táblázat foglalja össze.

	Példák	A keletkezés lehetséges okai
1. rendű eltérés: alakhiba 	egyenesség-, síklapúság-, köralakhiba	a szerszám gép vezetékhibái, a szerszám gép vagy a munkadarab deformációja, hibás befogás, kopás
2. rendű eltérés: hullámosság 	hullámok	hibás szerszám befogás, a munkadarab-szerszám gép-szerszám rendszer lengései
3. rendű eltérés: érdesség 	barázdák	a szerszám vágóélének alakja, előtolás, fogásmélység
4. rendű eltérés: érdesség 	karcok, pikkelyek, dudorok	forgásképződés során anyagrészecskék kiszakadása, elnyíródása, homokfűvaskor a felszín képlékeny alakváltozása, egyenetlen rétegek képződés galvanizálásakor
5. rendű eltérés: érdesség 	szövetszerkezet mintázata	kristálykitöredezés, a felület változása vegyi hatás következtében, korrózió
6. rendű eltérés: szubmikroérdesség 	kristályszerkezet mintázata	

3.1. táblázat. A felületi egyenetlenségek csoportosítása a DIN 4760 alapján

Az 1. rendű eltérések, az alakhibák a felület egészére kiterjedő makrogeometriai eltérések, amelyek hossz- és szögmérő eszközökkel vagy idomszerekkel vizsgálhatók és értékelhetők.

Az értekezés témáját képező 2. rendű eltérés a hullámosság, amely keletkezésének leggyakoribb oka a munkadarab-szerszám gép-szerszám rendszer valamilyen instabilitása, például a köszörűkorong kiegyensúlyozatlansága által gerjesztett lengés, a szerszám befogó- és vezető készülékek hibái, belső feszültségek stb. Emiatt a hullámosság értékelése a technológia állapotfelügyeletének eszköze lehet, a hullámossági paraméterek változásából a gyártástechnológia jellemzőinek változására lehet következtetni.

A 3–5. rendű eltérések nagyságrendje ugyan különböző, de határozott szétválasztásukra nincs lehetőség, ezért ezek gyűjtőfogalomként az érdesség elnevezést kapták. A gépalkatrészek felületi érdességének átlagos érdességmagassága az alkatrészsel szemben támasztott követelményektől függően általában 0,1 μm és 100 μm között van [Ko07].

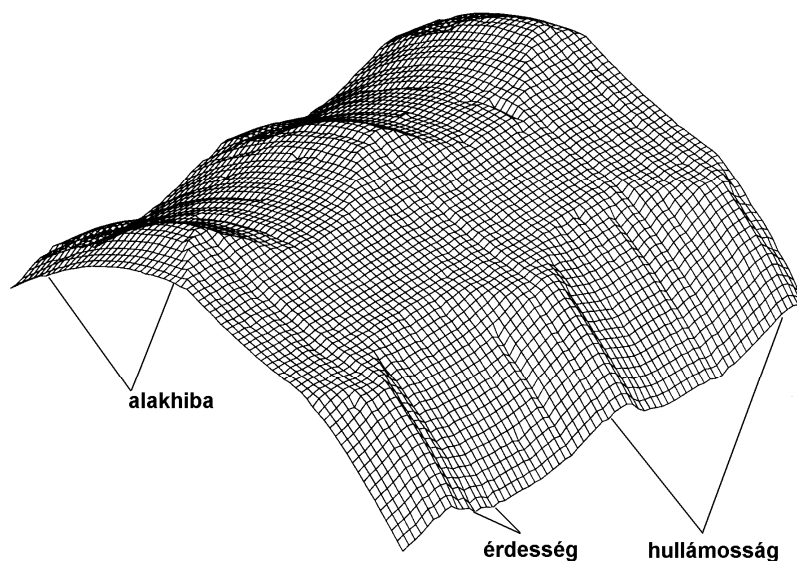
A 6. rendű felületi eltérés a szubmikroérdesség (nanoérdesség) sok szempontból a kutatások fókuszába került, számos technológia (pl. AFM) lehetővé teszi ennek mérését, vizsgálatát. Az ipari gyakorlatban viszont a szubmikroérdesség nagyságát mérésrel ma még rendszerint nem állapítják meg, bár tribológiai szempontból nagyon fontos lenne [Ko07].

Kozma az eltéréseket négy kategóriába sorolja [Ko94]: makrogeometriai eltérések (alakhiba), hullámosság, érdesség és szubmikroérdesség. A hullámosság a valós felület többé-kevésbé periódikus eltérése a makrogeometriai alaktól. A hullámhosszúság rendszerint 0,5–10 mm, a hullámmagasság pedig 0,005–0,5 mm. A makrogeometriai eltéréseket és a hullámosságot a megmunkáló szerszám- és gép hibái, valamint kisciklusszámú lengései idézik elő.

A francia autóipar igényei alapján kidolgozott NF E 05–015 szabvány ugyan a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának, a felületi geometria jellemzésének teljesen újszerű módját, az azóta a nemzetközi gyakorlatban is elfogadott motív alapú kiértékelést írta elő, de az egyenetlenségek osztályozását tekintve nem alkalmazott lényegesen különböző megközelítést. A motív kiértékelésre is kiterjedő nemzetközi ISO szabvány megjelenése miatt időközben visszavont NF E 05–015 szerint az egyenetlenségeknek négy összetevőjük van: alakhiba, hullámosság, érdesség és visszamaradó érdesség, a hullámosságot pedig olyan geometriai eltérésként definiálta, amelynél a szomszédos csúcsok távolsága nagyobb, mint 0,5 mm, de nem nagyobb, mint 2,5 mm. A hullámosság adódhat a rendszer kisfrekvenciás rezgéséből, vagy a forgácsolási jellemzőkből.

Trumpold és Held [TrHe98] a névleges mérettől és alaktól való eltéréseket géptől és gyártási folyamattól függő tényezőkre (pl. vezetékek hibái, gép-szerszám-munkadarab rendszer rezgései, befogási pontatlanság, hőmérséklet instabilitás, technológiai jellemzők), szerszámtól függő tényezőkre (pl. szerszám-geometria, szerszámkopás, érintkezési és súrlódási viszonyok az alakítás vagy megmunkálás során) és munkadarabtól függő tényezőkre (pl. az előgyártmány geometriája, a munkadarab merevsége, méret és anyagjellemzők) vezetnek vissza. A felület geometriai eltéréseit – a felsorolt okoktól függetlenül – méreteltérés, alakhiba (mely magába foglalja a hullámosságot), és felületi érdesség csoportokba sorolják. Ugyanakkor a felületi érdességet és a hullámosságot mikrogeometriai eltérésként értelmezik, és a hullámosság fő okának a munkadarab-szerszám-gép-szerszám rezgéseit tartják.

A mikrotopográfia 3D-s kiértékelésével foglalkozó átfogó tanulmányukban Stout és szerzőtársai [StSuDo93] a felületen értelmezték az alakhibát, hullámosságot és érdességet (3.4 ábra).



3.4. ábra. A 3D-s felület érdessége, hullámossága és alakhibája [StSuDo93]

Összegzés

Összegzésképpen megállapítható, hogy a szakirodalom az eltéréseket szinte teljesen egységesen alakhiba, hullámosság és érdesség kategóriákba sorolja, különbség csak az érdesség kistérközű komponenseinek (mikroérdesség, szubmikroérdesség, visszamaradó érdesség) értelmezésében figyelhető meg. A szakirodalom egységes abban is, hogy az értekezés témáját képező hullámosság keletkezésének leggyakoribb oka a munkadarab-szerszám-gép-szerszám rendszer valamilyen rezgést vagy lengést okozó instabilitása. A hullámosság fogalmának definiálásában, a hullámhossz, az amplitúdó vagy ezek viszonyának számszerűsítésében viszont nincs egység, aminek elsődleges oka a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának különböző módszereiben keresendő.

3.1.2 A hullámosság vizsgálatának történeti áttekintése

A felületek jellemzésére szolgáló érdességmérés ugyan sok évtizedes múltra tekinthet vissza, de a hullámosság mérésének és jellemzésének szükségességét a kutatás és az ipar csak jóval később ismerte fel.

A felületminőséggel kapcsolatos kutatások eredményeképpen a múlt század harmincas éveiben született meg a „mikrogeometria” tudományág. Abbot és Firestone az Egyesült Államokban 1933-ban hozták létre a „*talysurf*” nevű metszertapintós berendezést, mely képes volt a felület egy profilját letapogatni, és grafikus úton megjeleníteni. Ezt követően igen gyorsan megjelentek Németországban és Angliában az első analóg műszerek, melyek képesek voltak átlagos érdességi értéket meghatározni. Ezek az eszközök analóg RC szűrők segítségével szűrték ki a hullámosságot és az alakhibát [StSuDo93].

Közben a kutatók kimunkálták a felületminőség jellemzésére szolgáló mérőszámokat, és az 1930-as években már mód nyílt az érdességi jellemzők szabványosítására [Ma80]. A felületminőség előírásainak nemzetközi megfogalmazása a felületi érdesség jellemzőinek egységesítésével kezdődött 1950-ben. Ekkor kezdte meg tevékenységét az ISO TC 57 „Megmunkált felületek minősége” (Quality of Machined Surfaces) elnevezésű Műszaki Bizottsága, amely 1971 óta más néven (Metrology and Properties of Surfaces) működik. Az ISO/TC 57 bizottság által kidolgozott első nemzetközi szabványajánlást ISO/R 468–1966 „Felületi érdesség” címmel 1966-ban tették közzé.

Az 1970-es évek elejétől figyelhető meg azoknak a nézeteknek a felerősödése, melyek szerint a hullámosságnak a gépalkatrészek minősítésekor az addiginál nagyobb jelentőséget kell tulajdonítanunk. A Német Szabványügyi Bizottság illetékes albizottsága több tanácskozást folytatott arról, hogy a felületi érdesség befolyása milyen mértékben döntő az alkatrész használhatósága szempontjából [Sc73]. Egyértelműen kiderült, hogy az alakeltérés és hullámosság hatása legalább olyan fontos, mint az érdességé. Annak, hogy ezekre mégis kevés figyelmet fordítottak, egyik valószínű okát a megfelelő műszerezettség hiányában látták. Több szakember fejtette ki azt a nézetét, miszerint a jövőben talán a felületi érdességgel szemben támasztott követelményeket csökkenteni lehet, ha az alakeltérésnek és hullámosságnak a gyártmány felhasználhatóságára gyakorolt hatása tisztázódik [Dr75, HaEk71].

1973-ban adták ki a meglévő kelet-európai nemzeti szabványok alapján kidolgozott KGST RSz 3951–73 "Felületi hullámosság. Fogalmak, meghatározások és paraméterek" című szabványosítási javaslatot, amely egységesítette a felületi hullámosság legfontosabb jellemzőit és azok számértékeit, továbbá a hullámosság vizsgálatához szükséges mechanikus és villamos szűrők legfontosabb adatait.

A hullámosság hazai szabványosításának első állomásait az MSZ 4721/3–75, majd a helyette kiadott MSZ 9655–81 „Hullámossági jellemzők fogalom meghatározásai és számértékei” – lényegében az RSz 3951–73-ra épülő –, valamint a hullámosság meghatározására alkalmazott mérési elveket és módszereket egységesítő MSZ 9656–88 „Felületek mikrogeometriai vizsgálatának módszerei” szabványok jelentették. Bevezetésük egyértelműen hozzájárult ahhoz,

hogy a hullámosság a hazai ipari gyakorlatban a korábbinál nagyobb figyelmet kapjon, ugyanakkor ezek a szabványok bizonyos területeken felesleges kötöttségeket tartalmaztak.

Ehhez kapcsolódóan mérésekkel igazoltam, hogy a hullámosság szabványos kiértékelése az értékelési hosszra vonatkozó feleslegesen szigorú előírás következtében sok esetben nem lehetséges, és a fejlett ipari országok előírásai, valamint saját mérési eredményeim elemzése alapján javaslatot fogalmaztam meg a mérési feltételek módosítására vonatkozóan [Ho89, Ho90, Ho92].

A 90-es évek elején az egyes nemzeti szabványokban a hullámosság értelmezését, az egyes paraméterek definícióját és jelölését illetően jelentős különbségek voltak, sok ország esetében nem is léteztek a felületi hullámosságra vonatkozó előírások [Ho90, Ho92]. Az egységesség hiányát, a hullámosság fogalmának lényegesen eltérő definiálását és a szabványosított hullámossági paraméterek különbözőségét jól érzékeltetik az alábbi példák:

- Az MSZ 9655–81 a hullámosságot olyan egyenetlenségként definiálta, ahol a hullámhossz rendszerint nagyobb, mint az amplitudó 40-szerese és kisebb, mint az alkatrész profilirányú méretének egytizede, illetve a körkerület 15-öd része. A hullámossági paraméterek származtatása a hullámossági profiltól történt, amely a valóságos felület egy metszetének leképezéséből az alakeltérés és az érdesség leválasztása után adódó profil. A magyar szabvány egy profilirányú (S_w) és három magasság irányú (W_z , W_{max} , W_t)⁹ hullámossági paramétert rögzített.
- A DIN 4774–81 német szabvány a hullámosság hullámhossz és az amplitudó arányát 100 és 1000 közé tette, és csupán a W_t hullámosság maximuma paramétert definiálta.
- Az ANSI¹⁰/ASME B 46.1–85 amerikai szabvány szintén csak a hullámosság maximuma paramétert tartalmazta, de az azonos értelmezés mellett más jelölést (W) használt.
- Az NF E 05–015 francia szabvány a nemzetközi gyakorlatban akkor általánosan használt középvasalás (M) rendszerben négy hullámossági paramétert értelmezett (W_{max} , W_t , W_p , W_a), de emellett az autóipar igényeihez igazodva a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának teljesen új módját, a motív alapú kiértékeléstechnikát is bevezette. A motív alapú kiértékelés kezdetben csak azokat a geometriai eltéréseket tekintette hullámosságnak, amelyeknél a szomszédos csúcsok távolsága nagyobb, mint 0,5 mm, de nem nagyobb, mint 2,5 mm.

A fentiekben túl a mérési feltételek sem voltak egységesek. Arra, hogy a szabványok különbözőségének, előírásainak hiányosságainak vagy ellentmondásainak következtében a hullámosság fontosságának felismerése után közel húsz évvel sem volt lehetséges a hullámosság egyértelmű és összehasonlítható jellemzése, korábbi dolgozatomban világítottam rá [Ho90]. Számos kutató és szakember sürgette az egységesítést, és ezen törekvések eredményeképpen kidolgozásra és elfogadásra kerültek azok a 2D-s nemzetközi szabványok, melyek felváltották a korábbi nemzeti szabványokat, megszüntették a hiányosságok többségét, feloldották az ellentmondások jelentős részét.

Az 1990-es évek elejétől számos kutató mutatott rá arra, hogy a felületi textúra megfelelő jellemzésére csak a 3D-s kiértékelés-technika alkalmas [StSuDo93, KoPa99, KoWi00], a működési tulajdonságok és a felületi topográfia közötti kapcsolat feltárására kizárólag 3D-s vizsgálatokkal van lehetőség [Sp96, ZaAsVa01]. Stout és társai a 3D-s kiértékeléstechnikát megalapozó –, az 1990 és 1993 között folytatott kutatás eredményeit összegző – munkájukban (az ún. „kék könyv”-ben) [StSuDo93] értelmezték a 3D-s felület érdességét valamint hullámosságát, bemutattak olyan szűrési

⁹ A paraméterek jelölésekor a hivatkozott szabványok előírásait követtem. Az 1997-től hatályos EN ISO 4287 szabvány az addig általánosan követett gyakorlattól eltérően megszüntette az alsó indexek használatát. Eszerint például az átlagos érdesség jele a korábbi, és még ma is elterjedten használt R_a helyett R_a .

¹⁰ American National Standards Institute

módszereket, melyek segítségével az érdességi és hullámossági felület is meghatározható, definiálták az amplitudó, térközi, hibrid és működési tulajdonságokat jellemző 3D-s paramétereket. Munkájuk és az az alapján 1994-ben kiadott EUR 15178 EN európai ajánlás megjelenését követően rendkívül intenzív műszerfejlesztés és a felületi érdesség 3D-s kiértékelésének szinte robbanásszerű elterjedése következett be. A kutatások 1998-tól a SURFSTAND nevű európai program keretében egyetemek és ipari partnerek részvételével folytatódtak, eredményeit pedig az ún. „zöld könyv”-ben [StBI00] publikálták, előkészítve ezzel az első 3D-s nemzetközi szabványt, és megteremtve a felületi topográfia, azon belül a hullámosság 3D-s kiértékelésének alapjait.

3.1.3 A hullámosság szabványosításának jelenlegi helyzete

A felületi hullámossággal kapcsolatban határozottan megfigyelhető a korábbi évtizedek sokféle és egymástól meglehetősen különböző értelmezéseinek közeledése. Ugyanakkor megállapítható, hogy a hullámosság jellemzésére az ipari gyakorlat ma is kizárólag 2D-s kiértékeléstechnikát használ, és a hullámossági topográfia a kutatásokban sem kap akkora hangsúlyt, mint az érdességi topográfia.

Annak köszönhetően, hogy a nemzeti szabványokat kiváltó, többségében az elmúlt évtizedben kiadott nemzetközi szabványok bevezetését jelentős kutatási tevékenység és nemzetközi kooperáció előzte meg, a hullámosság mérésével és jellemzésével kapcsolatos ellentmondások nagy része megszűnt ugyan, de ez a folyamat korántsem tekinthető lezártnak.

Az európai szabványok hullámossággal kapcsolatos előírásai ma az alábbiak szerint foglalhatók össze:

Az EN ISO4287 definiálja

- a hullámossági profil fogalmát és
- a profilból származtatható amplitudó- (vagy magasság-) irányú paramétereket, térközi (vagy vízszintes irányú topográfiai tulajdonságokat jellemző) paramétereket, hibrid (vagy összetett geometriai) paramétereket és funkcionális (vagy működési tulajdonságokat leíró) paramétereket¹¹.

Az EN ISO11562 előírja

- a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának – ilyen módon a hullámossági profil meghatározásának – módját (szűrés),
- a használható fázishelyes szűrők súlyfüggvényét és átviteli karakterisztikáit.

Az EN ISO12085 definiálja

- a motif alapú kiértékelést, azon belül a motif alapú hullámossági profil meghatározásának módját,
- a hullámossági motif paramétereket.

Az EN ISO 1302 a rajzi előírások szabályait tartalmazza.

A 2002-ben kiadott amerikai ASME B46.1 szabvány és az EN ISO szabványok között több, a hullámosság kiértékelését is érintő különbség van. A hullámossági profil meghatározása B46.1 szerint 2RC és Gauss-szűréssel is történhet, az ide vonatkozó ISO szabvány viszont csak a Gauss szűrést írja elő. Lényeges és figyelemre méltó különbségnek tartom, hogy az EN ISO 4287 szerint a hullámossági profilból 14 paraméter számítható (3.10. táblázat), az évekkel utána kiadott amerikai szabvány viszont csak a Wt hullámosságmagasság (waviness height) paramétert definiálja. Az európai EN ISO szabványok valamint az amerikai B46.1–2002 szabványok különbségei miatt Vorburger felvetette a szabványharmonizáció szükségességét [wVo04].

¹¹ A témához kapcsolódó EN ISO szabványoknak hivatalos fordítása jelenleg nincs, az értekezésben Palásti és szerzőtársai [PaKoPá01] által használt magyar elnevezéseket követtem.

A nemzetközi szabványok megjelenésében, illetve előkészítésében megtestesülő, az egységesítés irányába vivő tendenciák mellett ugyanakkor megfigyelhető, hogy egyes ágazatok, elsősorban az autóipar részéről, speciális igények fogalmazódnak meg.

A német autóipart és beszállítóikat tömörítő VDA az ISO előírások egy részét nem, vagy csak módosítással alkalmazza, melynek egyrészt szakmai okai vannak (pl. az ún. 16%-os szabályt és a λ szűrő kötelező alkalmazásának előírását nem tartják megalapozottnak, az új rajzi előírások véleményük szerint részben értelemzavaróak), másrészt viszont úgy ítélik meg, hogy a bevezetés aránytalanul nagy költségnövekedést eredményezne (pl. 60°-os csúcshögű tapintó általánossá tétele esetén). Ugyanakkor a VDA2007 ajánlás egy teljesen új hullámossági profilt, a periodikus jellegű, ún. „domináns hullámosság”-ot és abból származtatható három hullámossági paramétert (WDc, WDt, WDSm) definiál. Emellett még az egyes autógyártóknál is használnak a felületi mikrogeometria vagy topográfia minősítésére speciális előírásokat, mint például a csavarvonalyszerű megmunkálási nyomok nélküli (drillfrei, twistless) felület minősítési módszerét előíró VW 011 50–18 házi szabvány.

Hasonló módon megfigyelhető az eltérés a francia autóipar ágazati előírásaiban is. Annak ellenére, hogy a francia autóiparban kidolgozott motif alapú felületjellemzést az EN ISO 12085 átvette, a CNMO E05.015 ágazati szabvány további motif alapú hullámossági paramétereket is értelmez (SW, SAW, NW).

A felületi mikrogeometria, illetve topográfia, ezen belül a hullámosság jellemzésének alapvető kérdése a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának módja. Az ipari gyakorlat és a kutatás számára egyaránt nyilvánvalóvá vált, hogy az ISO szabványok szerinti szűrések bizonyos esetekben torz eredményhez vezetnek, ezért új szűrési módszerek bevezetésére vonatkozó javaslatok születtek [ChYaLi99, RaMuFu02, Wh04, Kr05, LeBe05, Se05, XuPiSo05, DiGeGr06]. A kutatói javaslatok alapján az ISO TC 213 bizottsága 2006-ban megjelentette az ISO/TS 16610 ajánlássorozatot, amely az új szűrési technikákat (pl. szplajn-, morfológia-, robust-, wavelet szűrők) specifikálja. Az új szűrők elsősorban hullámosság szempontjából legfontosabb tulajdonságait a 3.3 pontban foglalom össze. A kutatásokkal és a szabvány-előkészítéssel párhuzamosan a műszergyártók is intenzív szoftverfejlesztést végeztek, melynek eredményeit Blunt és társai ismertetik [BlJiLe08]. A korszerű műszerek alkalmasak a topográfia teljeskörű kiértékelésére, messzemenően kielégítve az ipar és a tudományos kutatás igényeit is.

Elsősorban a 3D-s jellemzésre irányuló átfogó projektekben [StSuDo93, Bl03] közreműködő kutatók és ipari szakemberek munkájának eredményeképpen jelenhetett meg 2007-ben az ISO/DIS 25178 szabványtervezet, amely definiálja a felületi topográfiához kapcsolódó fogalmakat, a háromdimenziós topográfiai – amplitudó irányú, térközi, hibrid és funkcionális– paramétereket.

Várható, hogy az elkövetkező 1–2 évben a kutatási eredményeket és szakmai tapasztalatokat is figyelembe véve kiadásra kerül a topográfia 3D-s jellemzésére vonatkozó első ISO szabvány. Ugyanakkor a 2D-s kiértékelés szabványai sem tekinthetők véglegesnek, hiszen többek között várható az előzőekben említett új szűrési technikák szabványosítása is. Az ezeket, valamint a legújabb, elsősorban 3D-s kiértékelésre vonatkozó kutatások eredményeit összefoglaló munkájában Blateyron [Bl06] megállapítja, hogy a 2D-s kiértékelés előírásaival kapcsolatban is felülvizsgálatra van szükség a kutatási eredmények és a gyakorlati tapasztalatok alapján.

Összegzés

A hullámosság 2D-s kiértékelésének EN ISO szabványai hozzájárultak ugyan az egységesítéshez, de ez a folyamat nem tekinthető lezártnak. A szabványok hiányosságai, az ágazati igények, az amerikai szabvány különbözősége és a 3D-s kiértékelési szabvány közeljövőben várható megjelenése következtében szükség lesz az érvényes szabványok átdolgozására.

3.2 A felületi hullámosság mérésének lehetőségei

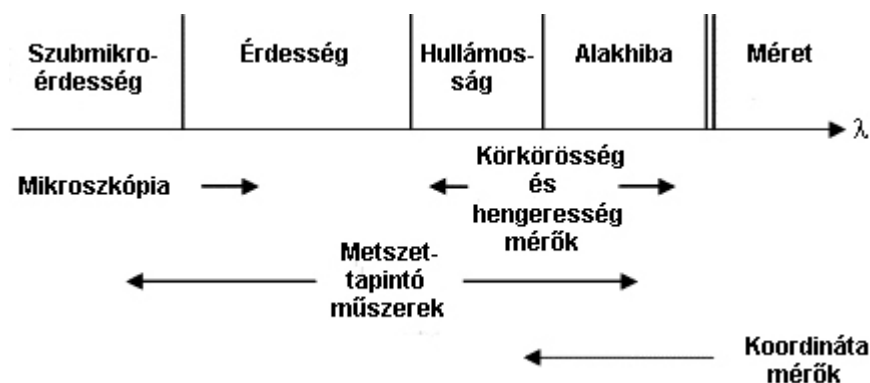
3.2.1 Módszerek áttekintése

Mára a különböző igényekhez igazodóan számos felületvizsgálati technika alakult ki, amelyeket a 3.2. táblázat foglal össze.

	Tapintófejes technika	Optikai mérések	Egyéb technikák
Számszerűsíthető eredmények	<ul style="list-style-type: none"> –Mechanikus berendezések –Elektronikus berendezések 	<ul style="list-style-type: none"> –Visszatükröződésen alapuló (Specular reflectance) –Teljes integrált szórás (Total integrated scatter) –Írányeloszlás (Angular distribution) –Direkt Fourier-transzformáció –Ellipszometria 	<ul style="list-style-type: none"> –Mechanikus eljárások (STP, SCPM, SICM, LFM, MFM, stb.) –Elektronikai eljárások (kapacitív alapú berendezések, nagyfrekvenciás váltóáramú berendezések) –Fluid technikák –Akusztikus technikák
Képi megjelenítés	Mért felület képi megjelenítése (felületi háló)	<ul style="list-style-type: none"> –Optikai metszetek (Optical sections) –Optikai tapintók (Optical probes) –Interferométerek 	<ul style="list-style-type: none"> –Vékony metszetek (Taper Sectioning) –Elektronmikroszkópia (TEM, SEM) –Pásztázó mikroszkópok (STM, AFM, SNAM)

3.2. táblázat. Felületvizsgálati technikák [Th98]

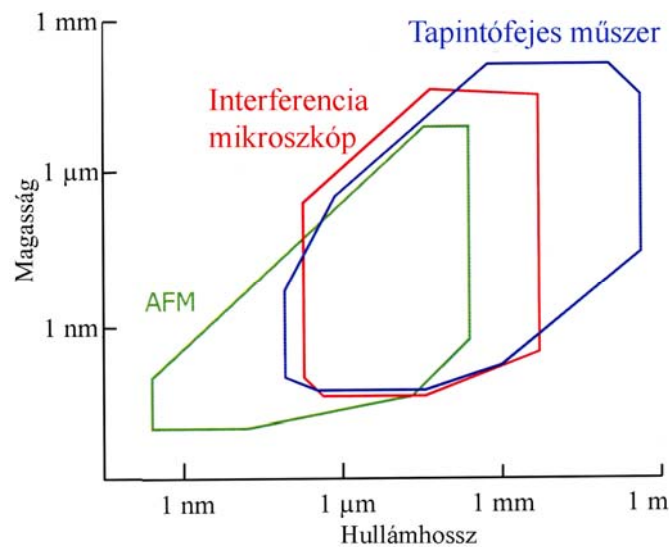
A különböző rendű egyenetlenségek vizsgálatára alkalmas műszertípusokról Raja és társainak az érdesség, hullámosság és alakhiba szétválasztási lehetőségeit elemző cikke [RaMuFu02] tartalmaz áttekintést (3.5. ábra). Eszerint a tapintófejes (metszertapintó) műszer a felületi érdesség és hullámosság vizsgálatára egyaránt alkalmas.



3.5. ábra. Felületvizsgálati technikák használhatósága [RaMuFu02]

De Chiffre és szerzőtársai [ChKuPe03], valamint Malburg [Ma07] a leggyakrabban alkalmazott módszerek használhatósági tartományáról közöltek hasonló tartalmú áttekintő diagramot (3.6. ábra).

Ebből is kitűnik, hogy a felületi mikrogeometria, illetve mikrotopográfia vizsgálatához univerzális mérési módszer nem áll rendelkezésre, a megfelelő technikát az adott mérési-kiértékelési problémához igazodóan kell kiválasztani.



3.6. ábra. Felületvizsgálati technikák alkalmazhatósága [Ma07]

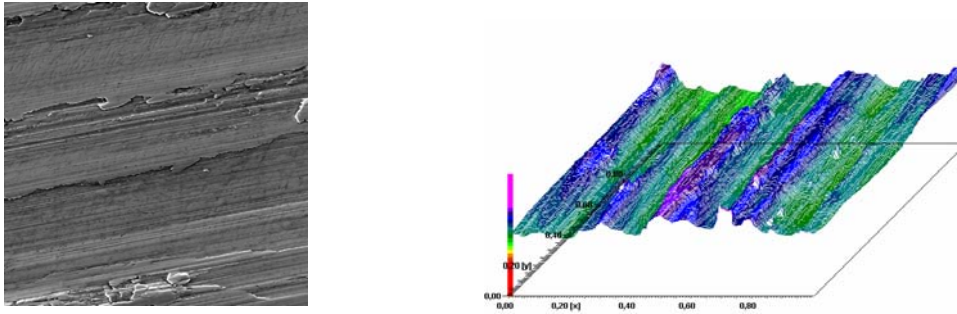
Az atomerő-mikroszkóp (AFM¹²) például rendkívül nagy felbontású, 10 pm nagyságrendű magasságirányú eltérések érzékelésére alkalmas, de csak nagyon kis (kb. 150x150 μm) terület vizsgálható vele. Az AFM tehát megfelelő eszköz a különlegesen finom megmunkálású felületek (pl. mikroelektronikai rétegek, memória egységek, optikai felületek, lézertükrök, optikai szálak) minősítésénél, de a gépészetben sokkal gyakrabban előforduló durvább felületek, különösen a 150 μm-nél többszörösen nagyobb hullámhosszú felületi hullámosság vizsgálatára nem megfelelő.

A szakirodalmi adatok alapján a tapintófejes vagy metszettepintós technika közelítőleg 1/10 μm hullámhossz- és 1/10 nm amplitudó értéktől elegendően tág határok közt alkalmazható, tehát a gépalkatrészek felületi mikrogeometriai, illetve mikrotopográfiai vizsgálatára az esetek túlnyomó többségében kutatási célokra és az ipari gyakorlatban egyaránt alkalmas. A korszerű tapintófejes műszerekkel megoldható a felület pontjainak megfelelő sűrűségű és pontosságú digitalizálása, a számítógépes kiértékelés pedig az adatok feldolgozását követően a képi megjelenítést és a teljeskörű paraméteres kiértékelést egyaránt lehetővé teszi. További előnye, hogy a tapintófejes technika mérési-kiértékelési paraméterei (tapintócsúcs geometriája, terhelőerő, szűrési paraméterek) nagyrészt szabványosítottak, így a mért értékek összehasonlíthatósága biztosított.

A metszettepintós módszerrel felvett topográfia információit jól kiegészítheti az elektronmikroszkópos felvétel. A pásztázó elektronmikroszkóp igen hatékony eszköz a felület részletes képi megjelenítéséhez. Felbontóképessége elérheti az 1 nm-t. Működése azon alapszik, hogy egy jól fókuszált elektronnyalábbal végigpásztázzák a vákuumban lévő minta felületét és a mintából származó jelekkel (szekunder elektronok, visszaszórt elektronok, röntgen sugárzás) leképezik a minta felszínét oly módon, hogy a mikroszkóp elektronnyalábjával szinkron működő katódsugárcső fényintenzitását a mintáról kapott jellel modulálják. A felületi mikrotopográfia témakörében az elektronmikroszkóppal kapott eredmények csak részben számszerűsíthetők, így az eszközt a vizsgált felület részleteinek megtekintésére, elemzésére használjuk. A képi megjelenítés segítségével sok olyan információt kaphatunk a felületről, ami magyarázatul szolgál az egyébként nem érzékelhető, a mikrotopográfiai szintjén lezajló jelenségekre [Po94].

¹² Atomic Force Microscope

A 3.7. ábra egy mart felület metszettepintós műszerrel felvett topográfiája mellett a BMF BGK JEOL JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkópjával (SEM¹³) készített felvételt mutatja be. Az elektronmikroszkópos felvétel 500-szoros nagyításban készült, ezért ezen a képen kevésbé vehetők ki a szerszám által hagyott jellegzetes megmunkálási nyomok. Megfigyelhetők azonban a felület legapróbb részletei, az elkenődések és a lerakódások. A SEM felvételen csak vizuálisan érzékelhető a mélység, a felvétel nem ad számszerűsíthető paramétereket. A tapintófejes műszerrel készített topográfiai felvétel viszont jól mutatja a jellegzetes megmunkálási nyomokat, valamint a felület magasság irányú méreteit, és azok számszerűsíthető jellemzőit is képes szolgáltatni. Hátránya, hogy kevésbé kivehető az apróbb hibák.

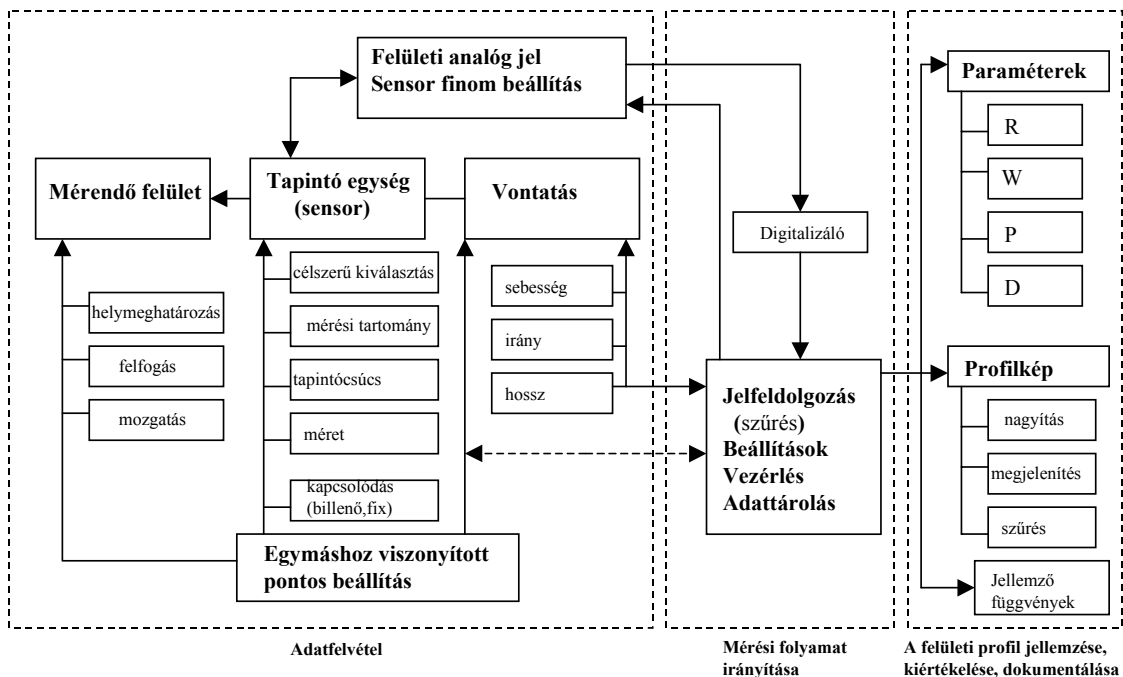


3.7. ábra. Mart felület SEM képe és topográfiája [FaCzPaHo05]

A rendelkezésemre álló metszettepintós elven működő Mahr Perthen Concept típusú 3D-s érdességmérő készülék, valamint a JEOL JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkóp segítségével a kutatási célok eléréséhez szükséges vizsgálatok tehát elvégezhetőek voltak.

3.2.2 A mérésekhez használt metszettepintós műszer alkalmazásának bemutatása

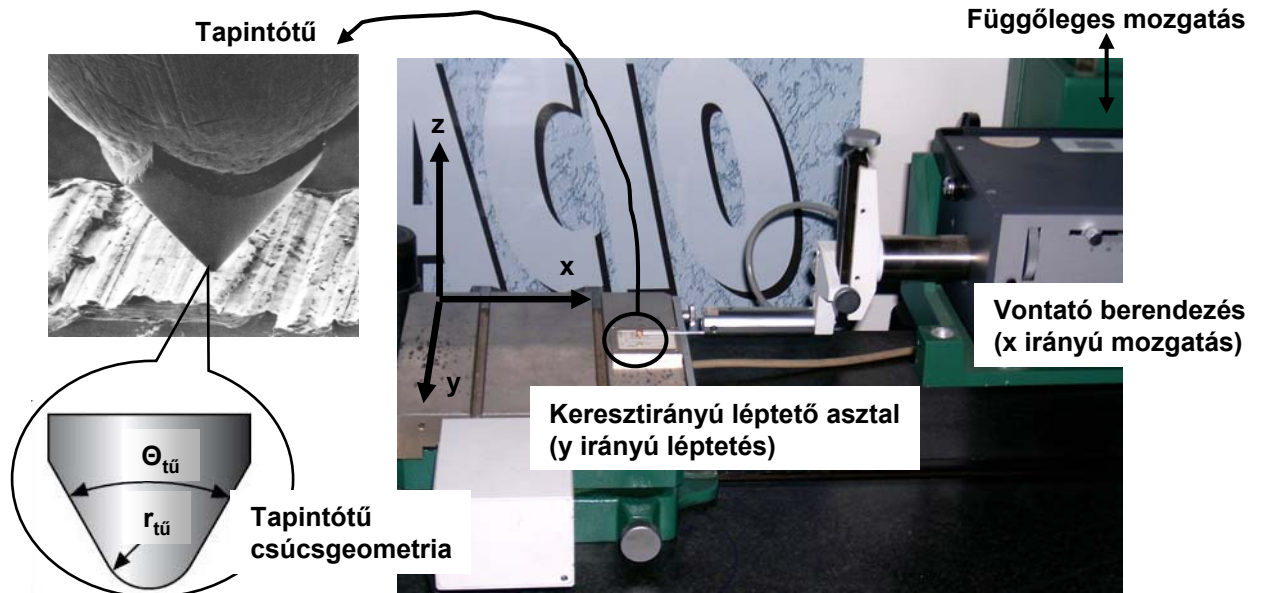
A mérőrendszer felépítését, blokk diagramját a 3.8. ábra szemlélteti.



3.8. ábra. A tapintófejes műszerrel végzett mérés rendszere [PaKoPá01]

¹³ Scanning Electron Microscope

A metszertapintós eljárás során a megfelelően kialakított tapintó végigcsúszik a felületen, és a mozgásából keletkező jel az átalakítóban elektromos jellé alakul. A tapintótűk többnyire kúp alakúak néhány μm -es csúcssugarú legömbölyített véggel. A kijövő jelet felerősítik, majd számítógépes feldolgozás következik. Az általam használt, a BMF Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán rendelkezésre álló Mahr Prethometer Concept típusú metszertapintós mérőkészülék fő egységeit a 3.9. ábra szemlélteti.

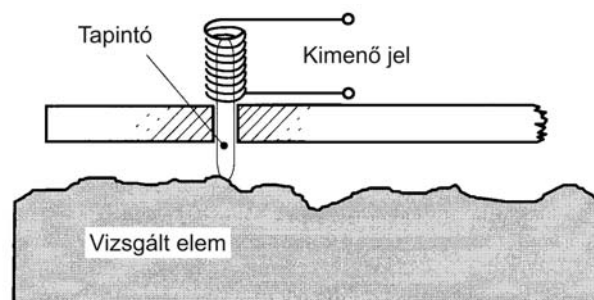


3.9. ábra. A használt metszertapintós berendezés [Cz07]

A metszertapintós mérőkészülék négy fő részből áll [StSuDo93]:

- tapintótű,
- mozgatóasztalok,
- elektronikus rendszer,
- számítógép a vezérléshez, az adatgyűjtéshez és a kiértékeléshez.

A tapintó egy gyémántkúpban végződő tűből és egy induktív jelátalakítóból áll, amely a tű elmozdulásával arányos elektromos feszültséget produkál (3.10. ábra).

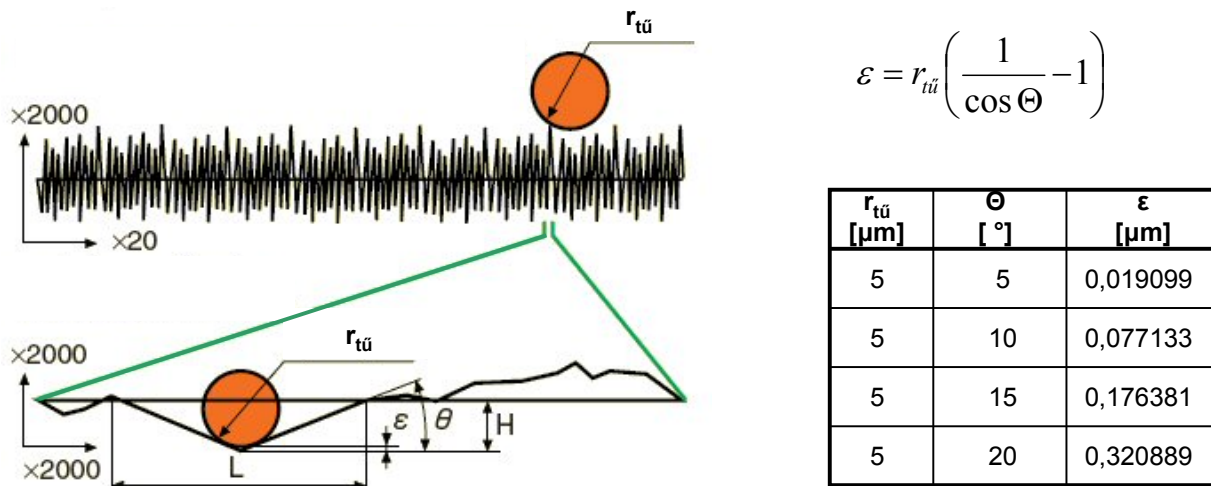


3.10. ábra. A tapintó részei [StSuDo93]

A tapintótű véges geometriájából adódóan nem lehet képes a profil tökéletes lekövetésére. A valós és észlelt profilok közti különbség a tű kúpszögétől, illetve csúcssugarától függ.

Palásti [Pa83] a tapintótű csúcssugarából származó hibát vizsgálta az R_a átlagos érdesség paraméterre vonatkozóan 1, 2, 5 és 10 μm csúcssugarú tapintók esetén. Vizsgálatainak

eredményeként megállapította, hogy $Ra=0,5 \mu\text{m}$ -nél nagyobb átlagos érdességű műszaki felületek esetén a tapintótű csúcssugara nem befolyásolta az átlagos érdesség értékét, $0,2\text{--}0,5 \mu\text{m}$ tartományban 10%-nál kisebb hiba adódott, $Ra=0,2 \mu\text{m}$ alatt viszont a 4 különböző tapintónál jelentős, többszáz %-os eltérés volt tapasztalható. A tapintótű geometriai jellemzőit az EN ISO 3274 szabvány írja elő. Eszerint $\lambda c=2,5 \text{ mm}$ határhullámhossznál minden esetben, $\lambda c=0,8 \text{ mm}$ határhullámhossznál pedig $Ra>0,5\mu\text{m}$ vagy $Rz>3\mu\text{m}$ érdességi paraméterek esetén $r_{t\ddot{u}}=5 \mu\text{m}$ csúcssugarú tapintótű használható. Czifra $5 \mu\text{m}$ -es csúcssugárnál vizsgálta a különböző profilhajlásszögekből adódó hibát [Cz07], és megállapította, hogy 10° -nál kisebb szögeknél a hiba $1/10 \mu\text{m}$ -es érték alatt marad (3.11. ábra).



3.11. ábra. Tapintótű csúcssugarából származó mérési hiba [Cz07]

Az ISO szabványban preferált csúcsszög 60° , de például a német autóipar ezt az előírást szükségtelen szigorításnak tartja, és a VDA 2006 ágazati szabvány 90° -os csúcsszögű tapintó használatát javasolja. Megítélésük szerint a 90° -os csúcsszögű tapintótű élettartama lényegesen nagyobb, használata pedig az autóipari alkatrészek esetében nem okoz információvesztést.

A mérésekhez használt FRW-750 jelű tapintó, melynek csúcsszöge $\Theta_{t\ddot{u}}=90^\circ$, csúcssugara $r_{t\ddot{u}}=5 \mu\text{m}$ a fentiek alapján az általam végzett vizsgálatokhoz megfelel. Az alkalmazott, ún. szabad tapintórendszer a tapintótű megvezetését a mért felületről függetlenül, nagy pontossággal megmunkált vezetőpályán, a regisztrálóbázison végzi, emiatt a vezetősaros tapintórendszerek mechanikus szűrőhatása következtében fellépő, elsősorban a hullámosságot érintő információvesztés nem jelentkezik. Meg kell jegyezni, hogy a regisztrálóbázist nem szabad a szabványokban meghatározott vonatkoztatási rendszerekkel összetéveszteni. A tapintórendszerek egyike sem képes olyan regisztrálóbázist nyújtani, amely a vonatkoztatási rendszerek vonatkoztatási vonalaival tökéletesen megegyezik [Pa77].

A 6 mN tapintóerő a vizsgált acélanyagú felületek esetében a mérési eredményt torzító rugalmas, vagy maradó alakváltozást nem okoz. Kis csúcssugarú, viszonylag nagy terhelőerejű tapintók esetében ugyanis előfordulhat, hogy a vizsgált anyag megfolyik a tapintótű alatt, hiszen a kis felületen alkalmazott kis terhelés nagy felületi nyomást eredményezhet. Nemcsak ez, de az anyag rugalmas deformációi is eredményezhetnek mérési hibákat. A túl geometriájából, illetve a túl nyomásból adódó információvesztés vagy torzulás elsősorban lágyabb anyagoknál és a kistérközű egyenetlenségek tartományában jelentkezik, így a hullámosság mérési eredményeit csak elhanyagolható mértékben befolyásolja.

Az X, Y, Z irányú elmozdulásokat egymástól független rendszerek valósítják meg. Az asztaloknak (vontatóknak) csak 1–1 szabadságfokuk van, előfeszített vezetékek beépítésével a műszergyártó nagy pontosságot valósított meg. A mérőrendszer vezérlése és az adatgyűjtés számítógéppel történik, A/D jelátalakítókkal.

A jelenlegi metszettepintós műszerek hátránya a 3D-s vizsgálatoknál jelentkező hosszú mérési idő. Az általam használt műszer átlagosnak tekinthető 0,5 mm/s vontatási sebességével egy 3x3 mm² nagyságú topográfia letapogatása 5 µm-es oldalirányú lépésközzel is közel 100 perc. A metszettepintós műszerek fejlesztésének emiatt egyik fő iránya a vontatási sebesség növelése, amit úgy kell megoldani, hogy a megnövelt sebesség következtében a tű ne emelkedjen el a felülettől [LoLuCh02].

3.2.3 A mintavételi távolság hatása

A kiértékelés során az egyik legalapvetőbb hibaforrást a digitalizálás jelenti. Palásti [Pa83] analóg és digitális módon felvett érdességi profilokon elemezte a mintavételi távolság (lépésköz) hatását, különböző (esztergált, köszörült, mart, szikraforgácsolt) felületeken vizsgálva 17 különböző 2D-s érdességi paramétert. A vizsgálatok 0,5, 1, 2, 4 µm-es lépésközzel történtek. Idevágó megállapításai az alábbiakban összegezhetők:

- A vizsgált analóg profilok legkisebb térközü összetevőjéhez tartozó határhullámhossz $\lambda_h=2$ és $\lambda_h=7$ µm között változott, így a jelben lévő frekvencia-információ akkor volt visszanyerhető, ha a mintavételezési lépésköz kisebb volt mint $\lambda_h/2$, azaz a vizsgált felület jellegétől függően 1–3,5 µm.
- A lépésköz növelésével a profilok jellege nem torzult, de információvesztés történt, több paraméter értéke jelentősen változott.

Hazai kutatók [KoVáPa00] mérései szerint ahhoz, hogy a topográfia mérése során ne veszítsünk információt 0,5–2 µm-es mintavételi távolság szükséges, a nagyobb lépésköz a kistérközű egyenetlenségek vizsgálati eredményeit torzítja. Ezt az eredményt erősítették meg szerzőtársaimmal végzett kísérleteink is [FaCzPaHo05], melynek során közel hasonló átlagos egyenetlenségű (Sa), eltérő megmunkálási eljárással előállított, alapvetően eltérő topográfiai jelleggel bíró felületek esetében vizsgáltuk a mintavételi távolság mikrotopográfiai paraméterekre kifejtett hatását.

Az EN ISO 3274 szerint $\lambda_c=0,8$ mm, vagy az alatti határhullámhossznál a maximális mintavételi távolság (lépésköz) 0,5 µm, $\lambda_c=2,5$ mm cut-offnál pedig 1,5 µm. Ezt, illetve a [Pa83] és [KoVáPa00] publikációkban ajánlott mintavételezési kritériumot az általam használt mérőberendezés teljesíteni tudja, ugyanakkor nagyobb felületek vizsgálatakor a kis lépésköz rendkívül nagy adatszámot, és hosszú feldolgozási időt igényel. Egy, a hullámosság megbízható kiértékeléséhez nem minden esetben elegendő 2,5x2,5 mm²-es topográfia kiértékelése például 1 µm-es lépésköznél legalább $6,25 \cdot 10^6$ adat felvételét és kezelését teszi szükségessé, ami abból a szempontból is problémát jelent, hogy a jelenleg hozzáférhető topográfiai szűrőszoftverek csak korlátozott számú adat feldolgozására képesek. Emellett a kiértékelés mintegy 6 órát venne igénybe, ami az ipari gyakorlat számára túlságosan hosszú.

Mivel a dolgozat témáját képező hullámosság viszonylag nagy térközü ismétlődő egyenetlenség, a hullámossági profil elvileg lényegesen nagyobb lépésközzel vehető fel, mint az érdességi profil. Erre vonatkozó vizsgálataim eredményét [Ho90] dolgozatban publikáltam. A különböző felületeken végzett 2D-s hullámosság-méréseim eredményeit a 3.3. táblázat foglalja össze.

A Perthometer S6P műszer kimeneti profiladatait digitális szűrőprogram és a saját fejlesztésű hullámosságot kiértékelő programcsomag dolgozta fel. A digitális szűrés $\Delta x=0,7$ µm lépésközzel felvett adatokból történt, de a hullámosság kiértékelését elvégeztem úgy is, hogy a program csak minden ötödik, huszadik, negyvenedik, majd nyolcvanadik adattal számolt. Látható, hogy a felületi

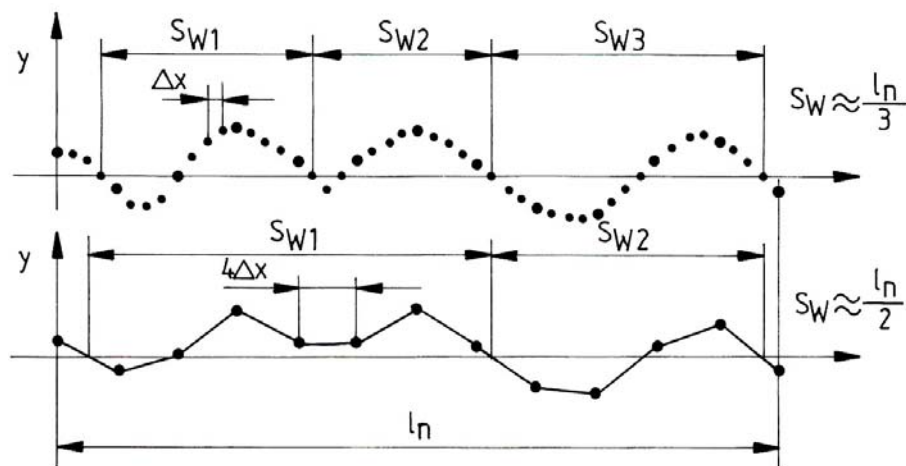
mikrogeometria mérési gyakorlatában rendkívül nagy számú $\Delta x=56 \mu\text{m}$ mintavételi távolság esetében tapasztalhatók csak az első jelentősebb eltérések.

Az is megfigyelhető, hogy elsősorban a közepes hullámhossz (S_w) értékei változnak, ezek viszont egyes esetekben ugrásszerűen. A jelenség oka az, hogy a mintavételi lépésköz növelésének következtében a profil és a középív metszéspontjainak száma csökkenhet (3.12. ábra)

Mégmunkálás	Átlagos érdesség R_a	Határ-hullám-hossz λ_B^* (mm)	Mérési hossz l_n (mm)	Lépésköz Δx (μm)	Paraméterek (μm)			
					S_w	W_{max}	W_z	W_t
Szuperfinis	0,08	0,25	4	0,7	1951	0,12	0,12	0,12
				3,5	1951	0,12	0,12	0,12
				14	1951	0,12	0,12	0,12
				28	1958	0,12	0,12	0,12
				56	1888	0,12	0,12	0,12
Simító esztergálás	1,28	0,8	4	0,7	610	0,63	0,29	0,63
				3,5	611	0,63	0,29	0,63
				14	611	0,63	0,29	0,63
				28	611	0,63	0,29	0,63
				56	626	0,63	0,28	0,63
Palástmarás	3,12	0,8	4	0,7	694	5,29	4,41	5,29
				3,5	694	5,29	4,40	5,29
				14	694	5,29	4,37	5,29
				28	693	5,29	4,32	5,29
				56	1020	5,25	4,19	5,25

* A határhullámhossz a mérés idején érvényes szabvány szerint jelölve

3.3. táblázat. A lépésköz hatása a hullámossági paraméterekre [Ho90]



3.12. ábra. A megnövelt lépésköz lehetséges hatása az S_w paraméterre [Ho90]

A 3.3 táblázatban közölt mérési eredményekből levonható az a következtetés, hogy a $\Delta x=56 \mu\text{m}$ lépésköz elég a hullámosság magassági paramétereinek meghatározásához, a közepes hullámhossz pedig $10 \mu\text{m}$, vagy azalatti lépésközökkel határozható meg. Az ennél kisebb lépésköz a hullámossági paraméterek pontosságát észrevehetően már nem javítja.

A hullámossági profil meghatározására szolgáló digitális szűrés pontossága érdekében a cut-off-on belül legalább 15 profilpontra van szükség [wSy05]. Ez $\lambda_c=0,25 \text{ mm}$ cut-offnál $250 \mu\text{m}/15=16,6 \mu\text{m}$ mintavételi távolságot jelent, tehát $\lambda_c \geq 0,25 \text{ mm}$ határhullámhosszak esetén a $\Delta x=10 \mu\text{m}$ mintavételi távolság megfelel. Nagyon finom felületek esetén ($R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ vagy $R_z \leq 0,1$

μm vagy $R_{\text{sm}} \leq 0,04 \mu\text{m}$) a $\lambda_c = 0,08 \text{ mm}$ cut-off következtében a digitális szűrés pontossága ennél kisebb, $80\mu\text{m}/15 = 5,3\mu\text{m}$ mintavételi távolságot követel meg.

Összegzés

Az előzőek alapján a lépésközt a vizsgálati céltól függően célszerű megválasztani:

- amennyiben a profil, illetve topográfia kistérközű (érdességi) komponenseinek vizsgálata is szükséges, kis ($0,5\text{--}2 \mu\text{m}$) lépésközt kell választani,
- a hullámossági profil, illetve felület felvételéhez
 - $\lambda_c \geq 0,25 \text{ mm}$ cut-off esetén elegendő a $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ mintavételi távolság,
 - nagyon finoman megmunkált felületeknél, ahol az érdességi paraméterek kis értéke miatt az érdességet leválasztó szűrő cut-offja $\lambda_c = 0,08 \text{ mm}$, az információvesztés elkerülése érdekében $\Delta x = 5\mu\text{m}$ mintavételi távolság szükséges.

3.2.4 A mérési tartomány megválasztása

Mivel a hullámosság nagyterközű mikrogeometriai egyenetlenség, megbízható kiértékeléséhez nagy értékelési hosszra, 3D-s vizsgálat esetében pedig elegendő nagyságú felületre van szükség.

A hullámosság 2D-s kiértékeléséhez kapcsolódó jelenleg érvényes szabványok a motív alapú kiértékelés kivételével nem tartalmazzák az értékelési hosszra vonatkozó egyértelmű előírásokat. A W_t paraméter mérési körülményeit rögzítő DIN4774 szabvány a hullámosság értékelési hosszát viszonylag rövidre, a határhullámhossz (λ_c) ötszörösében határozta meg, ilyen módon mérsékelve az alakhiba befolyását. Korábbi nemzeti szabványaink először a közepes hullámhossz, majd pedig a profilon található legnagyobb hullámhossz ötszöröséeként írták elő a hullámosság értékelési hosszát.

A hatályos ISO szabványok nem tartalmazzák konkrét előírást az l_n értékelési hosszra (evaluation length), és az l_w hullámossági értékelési szakaszra (sampling length). Szabványelőírás szerint az l_w hullámossági értékelési szakaszt az alakszűrő λ_f határhullámhosszával azonos értékűre kell választani, de a λ_f értéke nincs meghatározva. Az l_n értékelési hossz egy vagy több l_w értékelési szakaszból állhat ($l_n = m \cdot l_w$, ahol $m \geq 1$ egész szám). A hullámossági profil maximális egyenetlenségét (W_t) valamint a működési tulajdonságokat jellemző $W_{\text{mr}}(c)$, W_{dc} és W_{mr} paramétereket az l_n értékelési hosszon, a többi hullámossági jellemzőt pedig az l_w értékelési szakaszon kell mérni. (Az érdességre vonatkozó előírások a hullámosságra vonatkozóktól eltérően egyértelműek: az l_r értékelési szakasz a hullámosság és érdesség szétválasztására szolgáló szűrő λ_c határhullámhosszával egyenlő, az értékelési hossz pedig ennek ötszöröse, azaz $l_n = 5 \cdot l_r$.)

A 2D-s középvezonalas hullámossági jellemzők, valamint a mérési paraméterek kapcsolatára vonatkozóan a korábbiakban különböző forgácsolt felületek esetében végeztem vizsgálatokat [Ho90]. A mérési eredmények elemzése alapján az alábbi következtetéseket fogalmaztam meg:

- A $\lambda_f / \lambda_c = 10$ viszony mellett a hullámosságot jól jellemző profilhoz jutunk. Az ennél rövidebb határhullámhosszúságú alakszűrés esetében csak egy keskeny hullámhossz sávot minősítünk hullámosságnak, a λ_f / λ_c viszony nagy értékénél viszont a kapott profil az alakhibát is tartalmazza. A 2D-s hullámosság-mérés esetén az értékelési szakasz is a λ_c tízszerese: $l_w = 10 \cdot \lambda_c$.
- A hullámosság paraméterei a kiértékelési hossz függvényében az $l_n / \lambda_c = 10\text{--}16$ érték felett lényegesen nem változtak. Eszerint a hullámosság megbízható kiértékeléséhez elegendő egy vagy két értékelési szakasz, azaz az $l_n = l_w$ vagy $l_n = 2 \cdot l_w$ előírás. Az ennél nagyobb értékelési hossz a hullámosság-mérés pontosságát nem javítja lényegesen, ugyanakkor okozhat méréstechnikai problémákat. Annak eldöntéséhez, hogy egy vagy két értékelési szakasz kerüljön kiértékelésre, célszerű figyelembe venni a ténylegesen működő felület nagyságát.

A hullámosság fentiek alapján ajánlott értékelési szakaszait és hosszait a λ_c határhullámhossz Ra-tól (nem-periodikus profil) vagy Rsm-től (periodikus profil) függő, szabvány szerinti értékeivel, valamint a hullámosság kiértékeléséhez szükséges maximális Δx lépésközzel együtt a 3.4 táblázat tartalmazza.

Rsm (mm)	Rsm \leq 0.04	0.04 < Rsm \leq 0.13	0.13 < Rsm \leq 0.4	0.4 < Rsm \leq 1.3
Ra (μ m)	Ra \leq 0.02	0.02 < Ra \leq 0.1	0.1 < Ra \leq 2	2 < Ra \leq 10
λ_c (mm)	0.08	0.25	0.8	2.5
Δx (μ m)	5	10	10	10
lw (mm)	0,8	2,5	8	25
ln (mm)	0,8–1,6	2,5–5	8–16	25–50

3.4. táblázat. A hullámosság javasolt értékelési szakaszai és hosszai

A mikrotopográfia mérési területére vonatkozó szabványelőírással nem találkoztam. A 3D-s vizsgálati tartományra vonatkozóan német kutatók végeztek kísérleteket [GeEnPf97, PfEnGe98]. Változó oldalhosszúságú, négyzetes értékelési felületeken (A_e evaluation area), különböző módon megmunkált lemezfelületeken vizsgálták a lemezalakítás tribológiai viszonyai szempontjából fontos „closed void area” (α_{cl}) és az „open void ratio” (α_{op}) paraméterek változását. Eredményeik szerint 6 mm²-nél nagyobb értékelési felületen a vizsgált, az érdességtől és hullámosságtól egyaránt függő jellemzők már nem változnak, tehát lemezek esetében a mikrotopográfia hullámosságra is kiterjedő vizsgálatához az $A_e \geq 2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ értékelési felület-kritérium fogalmazható meg.

A forgácsolt felületek vonatkozásában tett előző megállapításaim értelmében viszont a $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ topográfia a hullámosság jellemzésére csak finoman megmunkált (Ra \leq 0.1, ill. Rsm \leq 0.13) felületek esetében elegendő, egyéb esetekben nagyobb kiértékelhető felület vizsgálata szükséges (3.5. táblázat).

Rsm (mm)	Rsm \leq 0.04	0.04 < Rsm \leq 0.13	0.13 < Rsm \leq 0.4	0.4 < Rsm \leq 1.3
Ra (μ m)	Ra \leq 0.02	0.02 < Ra \leq 0.1	0.1 < Ra \leq 2	2 < Ra \leq 10
A_w (mm ²)	0,8x0,8	2,5x2,5	8x8	25x25

3.5. táblázat. A hullámosság kiértékeléséhez szükséges területek

Problémát jelent a feldolgozandó adathalmaz nagysága. Ahhoz, hogy a mérés során ne veszítsünk az érdességre vonatkozó információt a 3.2.3. pontban leírtak alapján 0,5–2 μ m-es mintavételi távolság szükséges. Ez egy 8 mm-es profilnál 4000 – 16000 adatot, egy 8x8 mm-es felület esetén 16 – 256 millió adatot jelent. Erre a jelenlegi mérőrendszerek nincsenek felkészülve, és a felület letapogatása rendkívül hosszú időt venne igénybe. Az általam használt Mahr Perthometer Concept mindössze 1001 tetszőlegesen hosszú profilt képes felvenni, 2 μ m-es mintavételi távolsággal ez mindössze 2 mm széles területet jelent.

Megoldást az adott géppark esetén egy kétlépcsős eljárás jelenthet. Első lépés az érdesség (a 3.3.4. szerinti S-L felület) vizsgálatához elegendő kis topográfia vizsgálata 0,5–2 μ m-es mintavételi távolsággal, második lépés pedig a hullámosság (a 3.3.4 szerinti S-F felület) vizsgálatához 5 vagy 10 μ m-es lépésközzel a szükséges méretű nagyobb topográfia kiértékelése.

Összegzés

Összefoglalva megállapítható, hogy a felületi hullámosság értékelési szakaszára, értékelési hosszára, illetve az értékelési területre egységes előírások nincsenek. Saját méréseim, illetve szakirodalmi adatok alapján ezeket az értékeket a 3.4. és 3.5. táblázat szerint a felület finomságától függően célszerű megválasztani. A hullámosság kiértékelését elegendő 5, illetve 10 μ m-es

lépésközzel végezni, ez a lépésköz viszont az érdesség esetében jelentős információvesztést eredményez. Emiatt célszerű az érdesség és hullámosság kiértékelését két lépésben, különböző lépésközzel és hosszon, illetve felületen végezni.

A hullámosság teljeskörű jellemzéséhez az előzőek szerinti nagyobb topográfia szükséges, ugyanakkor, különösen kistérközű hullámosság esetében (ahol a hullámhossz például $500\mu\text{m}$ környékén van) a hullámosság működésre gyakorolt hatásának vizsgálata során lényegesen kisebb, pl. $1 \times 1 \text{ mm}^2$ nagyságú felület vizsgálata is értékelhető információkat nyújt. Bizonyos esetekben a szükséges mérési hossz fizikailag sem áll rendelkezésre (pl. a felület nagy görbülete miatt nem megvalósítható a mérés, vagy a mérendő felület túl kicsi).

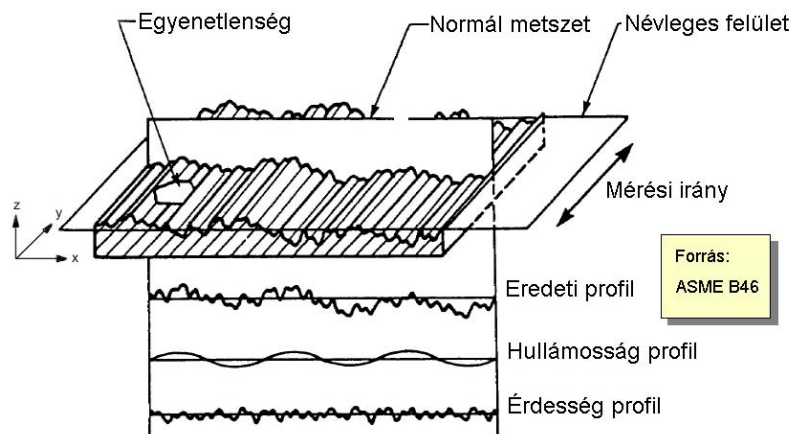
Amennyiben a felület jellemzése vagy minősítése a cél, akkor a mért jellemzők összehasonlíthatósága érdekében valamennyi mérési paramétert, beleértve a kiértékelési hosszt vagy felületet is, meg kell adni a 3.5.3. pontban bemutatásra kerülő módon.

3.3 A hullámosság elválasztása az alakhibától és az érdességtől

A felületi mikrogeometria, illetve mikrotopográfia teljeskörű jellemzése elvileg kétféle módon történhet.

Az egyik, ma még ritkábban alkalmazott módszer a makrogeometriai eltérések (alakhibák) figyelmen kívül hagyásával kapott – az érdességet és hullámosságot egyaránt tartalmazó – profilból, illetve felületből származtatott paraméterek meghatározásán alapul. A felület működésének vizsgálatához ez a megoldás sok esetben teljesebb információt nyújt, hiszen az érdességet és hullámosságot magában foglaló teljes felület vesz részt a működésben.

A másik, elterjedten használt megoldás esetében a kistérközű egyenetlenséget (érdesség) és a nagyobb térközű hullámosságot szétválasztjuk, és az így kapott érdességi, illetve hullámossági profilból (3.13. ábra) vagy felületből külön érdességi és hullámossági paramétereket határozzunk meg. (Ahogy erre az 1.1 pontban rámutattam, ma még szinte általános az a gyakorlat, hogy a szétválasztást követően csak az érdesség vizsgálatára vagy előírására kerül sor, és a működési tulajdonságokat sokszor jelentős mértékben befolyásoló hullámosságot figyelmen kívül hagyják.)



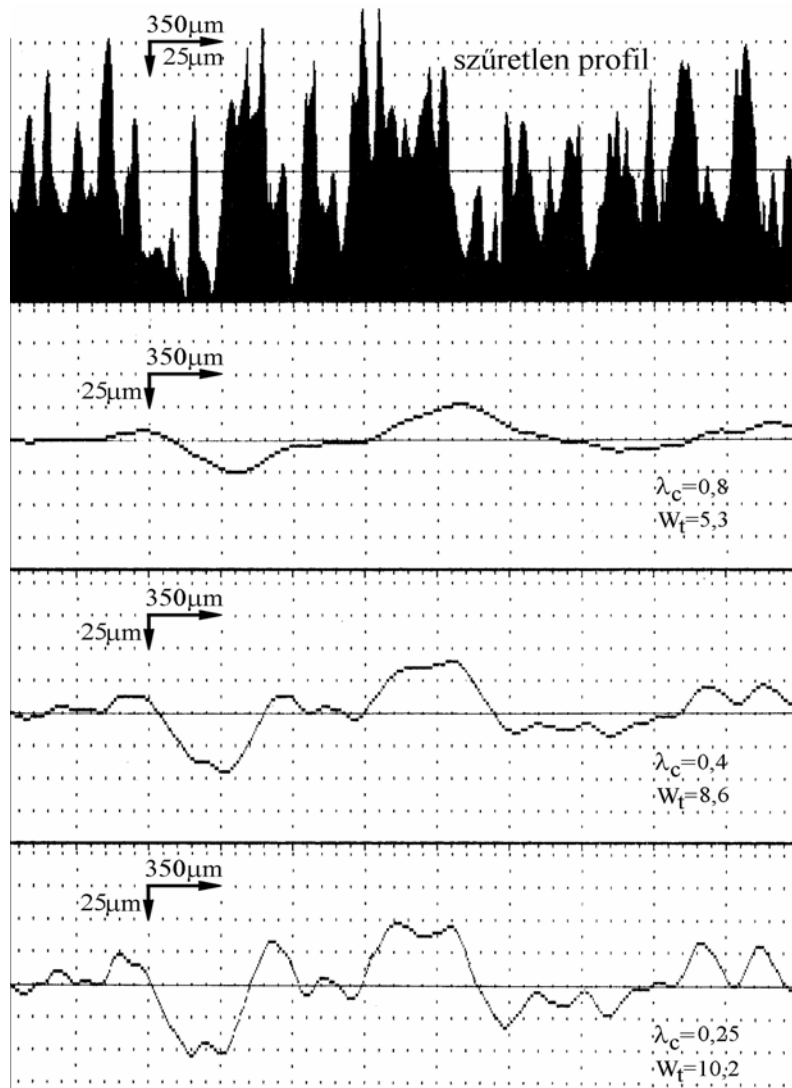
3.13. ábra. A hullámosság és az érdesség szétválasztása 2D-ben

3.3.1 A szűrés jelentősége

Mivel a 3.1.1 pontban leírtaknak megfelelően az érdesség és hullámosság más-más technológiai okokra vezethető vissza, a technológiai folyamatok vizsgálatához a szétválasztásra feltétlenül szükség van. Ugyancsak szükséges az érdesség és hullámosság szétválasztása olyan esetekben, amikor egyik vagy másik befolyása a működési körülményekre dominánsabb. Például lemezsajtolás során elegendő az érdességet előírni, mivel a hullámosság a tribológiai viszonyokat lényegében nem befolyásolja [St98], egyes tömítések esetében viszont a hullámosság tervezése és előírása a lényeges [wVo04].

A hullámosság és érdesség szétválasztása leggyakrabban hullámhosszaik alapján, szűréssel történik. A szűrésnek a hullámosság jellemzése szempontjából meghatározó jelentősége van, hiszen a magassági, hosszirányú, hibrid és funkcionális hullámossági paramétereket egyaránt az alakhibától és érdességtől megszűrt hullámossági profilból (2D), illetve hullámossági felületből (3D) származtatjuk. A szűrés a felületi mikrogeometria vizsgálatának egyik legkritikusabb és legtöbb bizonytalanságot tartalmazó része, hiszen különböző rendű eltérések teljesen egyértelmű szétválasztása valós felületek esetében azok sztohasztikus jellege miatt nem lehetséges. Az, hogy egy nagytérközű eltérést alakhibának vagy hullámosságnak, illetve egy kisebb térközű eltérést hullámosságnak vagy érdességnek tekintünk, függ többek között az eltérések definíciójától, a mérés, illetve a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának módjától. Ugyanaz az egyenetlenség, amit egy finoman megmunkált gépalkatrész esetében érdességnek tekintünk, egy optikai eszköz esetében már hullámosságnak számíthat [Wh94, StSuDo93].

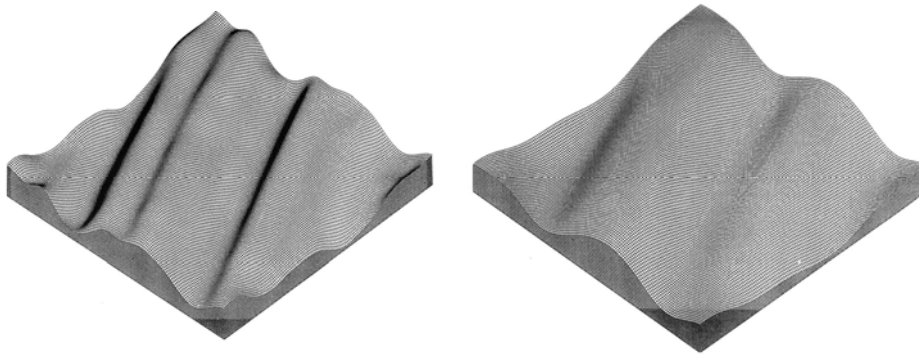
A 3.14. ábra különböző szűrési határhullámhosszakkal megvalósított hullámosság kiértékelésekre mutat példát. A profil kiértékelését saját fejlesztésű szoftverrel végeztem [Ho90], amely a Gauss-szűrés tetszőleges λ_c határhullámhossz (cut-off) értékeinek beállítását teszi lehetővé. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a határhullámhossz változása a hullámossági profilt, és ebből fakadóan a hullámosság jellemző paramétereit igen jelentős módon befolyásolja.



3.14. ábra. A hullámossági profil és a cut-off (λ_c) kapcsolata

Ugyancsak jelentősen befolyásolja a szűrt profil jellegét az alkalmazott szűrő típusa, ennek részletes bemutatására a 3.3.2 pontban kerül sor.

A szűrés meghatározó befolyása természetesen a 3D-s vizsgálatok során is jelentkezik. A 3.15 ábra ugyanazon felület, 2:1 arányú szűrőbeállításokkal kapott „hullámossági” topográfiait mutatja, jól érzékeltetve az amplitúdó- és hullámhossz különbségeket.



3.15. ábra. Különböző szűrésekkel kapott „hullámossági” felületek [StSuDo93]

A probléma összetettségéből adódóan tehát a szűrés a felületek vizsgálata és minősítése során komoly hibaforrást (esetleges információ veszteséget, torzítást) jelent. A későbbiekben rámutatok arra, hogy elvileg szabályos mérés során is bekövetkezhet olyan hiba, amely a paraméterek akár több száz százalékos eltérését is eredményezheti.

3.3.2 A szűrés lehetőségei 2D-ben

A különböző rendű egyenetlenségek szétválasztására az alábbi módszerek állnak rendelkezésre:

- szétválasztás a vonatkoztatási hosszal,
- mechanikus szűrés,
- elektromos szűrés,
- szűrés matematikai módszerekkel (digitális szűrés).

A vonatkoztatási hosszal megvalósított szétválasztást, a mechanikus szűrést, valamint az analóg elektromos szűrést korábbi dolgozatomban [Ho90] részletesen bemutattam és elemeztem. Mára ezek a módszerek lényegében teljesen a háttérbe szorultak, hiszen rendelkezésre állnak azok az informatikai eszközök és az igényeket folyamatosan követő szoftverek, melyek segítségével az egyenetlenségek szétválasztása digitális úton (azaz numerikus módszerek alkalmazásával) megvalósítható. A vonatkoztatási hosszal történő szétválasztás ugyanakkor a kiértékelési szakasz megválasztásával automatikusan megvalósul, hiszen például a 3.2.4 pontban leírtak szerint célszerűen megválasztott kiértékelési szakasz az alakhiba hatását eliminálja.

Napjainkban is megfigyelhető a digitális szűrőprogramok intenzív fejlesztése. A korszerű műszerek a néhány szabványosított szűrési eljárásom kívül több, a kutatók által javasolt szűrőprogrammal is képesek elvégezni a felületi geometria kiértékelését.

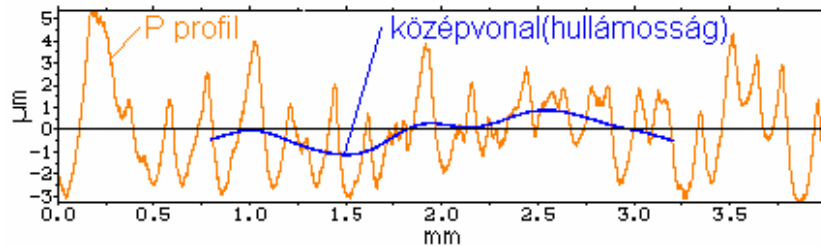
A különböző rendű egyenetlenségek azok hullámhossza alapján történő szétválasztására alkalmas eljárásokat három kategóriába sorolhatjuk:

- szűrés a középvonalas rendszerben (2RC-, Gauss-, kettős Gauss-, robust- és szplájn szűrők),
- szűrés a burkolóvonalas rendszerben (motif módszer, morfológiai szűrők),
- egyéb szűrők (wavelet-, Fourier-szűrő).

Az alábbiakban a gyakorlatban használt szabványos, illetve kutatók által javasolt, részben még tesztelési fázisban lévő szűrési módszereket foglalom össze, és ezen keresztül be szeretném mutatni az egyenetlenségek szétválasztásával kapcsolatos új tendenciákat, az egyértelműen megfigyelhető szemléletváltást.

3.3.2.1 Szűrők a középvasalás (M-) rendszerben

A középvasalás, vagy M-rendszerben történő kiértékelés során a $z=f(x)$ profiljelekből digitális szűréssel meghatározott középvasaláshoz (Mean line) viszonyítva értelmezzük az egyenetlenségek eltéréseit. A 3.16. ábra a felületi hullámosságot és érdességet tartalmazó P profilból, az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló szűrőeljárással számított középvasalást (ami a 2RC szűrés kivételével maga a hullámossági profil) mutatja, és az érdességi profil értékei ehhez a középvasaláshoz viszonyítva határozhatóak meg.

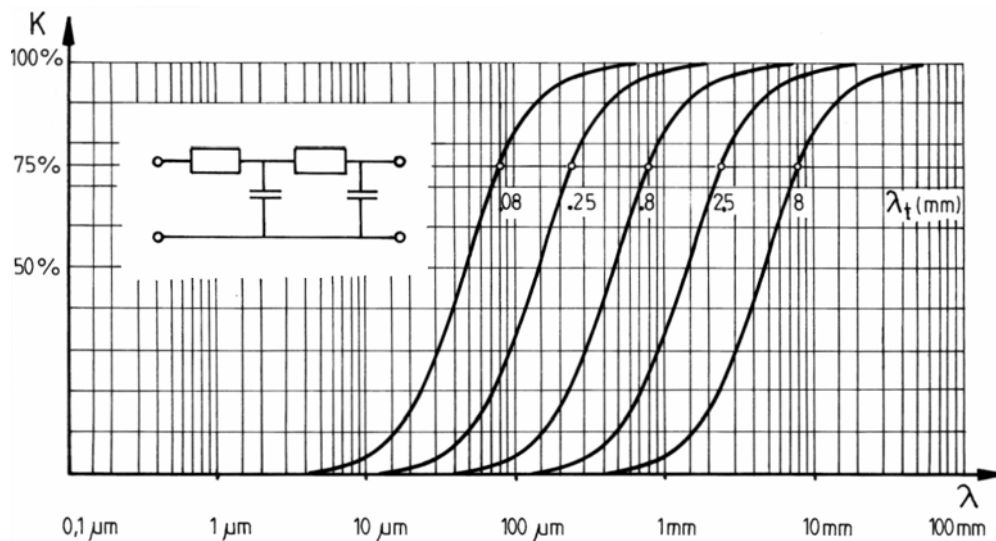


3.16. ábra. Az M rendszer középvasalásának értelmezése

A digitális kiértékelés térnyerésének időszakában az M-rendszer elterjedése volt megfigyelhető, a két vonatkoztatási rendszer elemzésével foglalkozó [Pa77] értekezés a burkolóvasalás, ún. E-rendszer szerinti értékelés visszaszorulását prognosztizálta. Az M-rendszerű értékelés bizonyos hátrányai miatt viszont általánossá vált, és a nemzetközi szabványosításban is megjelent, a kezdetben csak a francia autóiparban használt motif-alapú kiértékelés. Napjainkban már több kutató [LeBe05, DiGeGr06, Bl06] véleménye szerint a középvasalás rendszerrel szemben előnyösebb az E-rendszerű morfológiai szűrők használata, mivel ezek a topográfia tribológiai érintkezés szempontjából meghatározó csúcsonóját súlyozottabban veszik figyelembe, mint a kevésbé releváns völgyzónát. Ezzel egyidejűleg megfigyelhető, hogy a szakirodalomban egyre nagyobb hangsúlyt kapnak az egyéb szűrési módszerek (pl. wavelet szűrés).

a) A digitális 2RC szűrő

A felületi mikrogeometria vizsgálata során az első alkalmazott szűrő az analóg 2RC szűrő volt. Az érdesség kiszűrésére alkalmas 2RC szűrők különböző határhullámhosszhoz tartozó karakterisztikáit (a λ hullámhossz és K átvitel kapcsolatát) a 3.17. ábra mutatja.



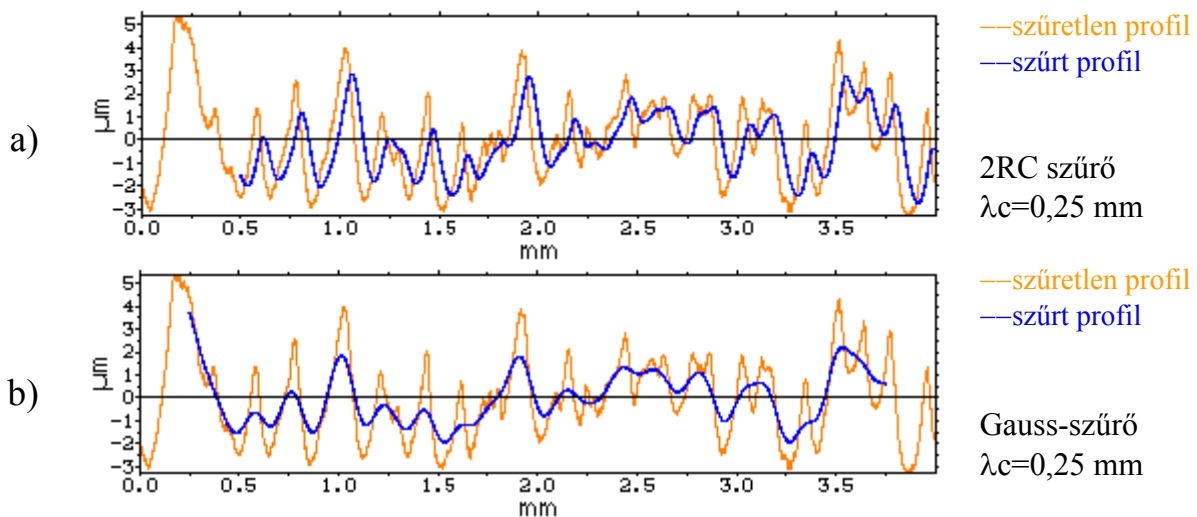
3.17. ábra. A 2RC hullámosságszűrők karakterisztikái [Ho90]

Az analóg szűrők használata mára gyakorlatilag megszűnt, de hasonló átvitelt megvalósító digitális szűrésre a korszerű műszerek egy része is képes.

A 2RC szűrő két lényeges kedvezőtlen tulajdonsággal rendelkezik:

- Az RC körök átviteli függvényéből adódóan frekvenciafüggő fáziseltolódás jelentkezik, amely a 3.18. ábrán a Gauss-szűrővel összehasonlítható módon jól megfigyelhető. Az a) és b) esetben a szűrést ugyanazzal a cut-off értékkel ($\lambda_c=0,25$ mm) végeztem, de 2RC, illetve Gauss-, szűrést használva. Látható, hogy a Gauss szűrő nagyobb mértékben “simítja” a profilt, a 2RC szűréssel kapott profil több nagyfrekvenciás összetevőt és fáziseltolódást is tartalmaz. Az RC szűrők fáziseltolódásának a hullámossági profilra gyakorolt torzító hatását Bodschwinn a egy korai publikációjában [Bo81] mutatta be.
- A cut-off határhullámhosszánál (a 3.17. ábrán λ_t -vel jelölve) megvalósuló 75%-os átvitel következtében az érdességszűrés során kapott középvonal nem azonos a hullámossági profillal, azaz a hullámosság és érdesség egy mérésével nem vizsgálható ($P \neq R+W$).

A 2RC szűrést az EN ISO szabványok nem tartalmazzák, de az az amerikai ASME B46.1–2002 szabványban megtalálható.



3.18. ábra. 2RC és Gauss-szűréssel kapott profil

b) A Gauss-szűrő

A Gauss-szűrő, melyet a 2RC szűrő hátrányainak kiküszöbölése érdekében fejlesztettek ki jelenleg a leelterjedtebben használt szűrő, melyet szabványos szűrőként definiál az EN ISO 11562 európai és az ASME B46.1 amerikai szabvány is. A Gauss-szűrő súlyfüggvénye:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} \exp\left(-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c}\right)^2\right), \quad (3.1)$$

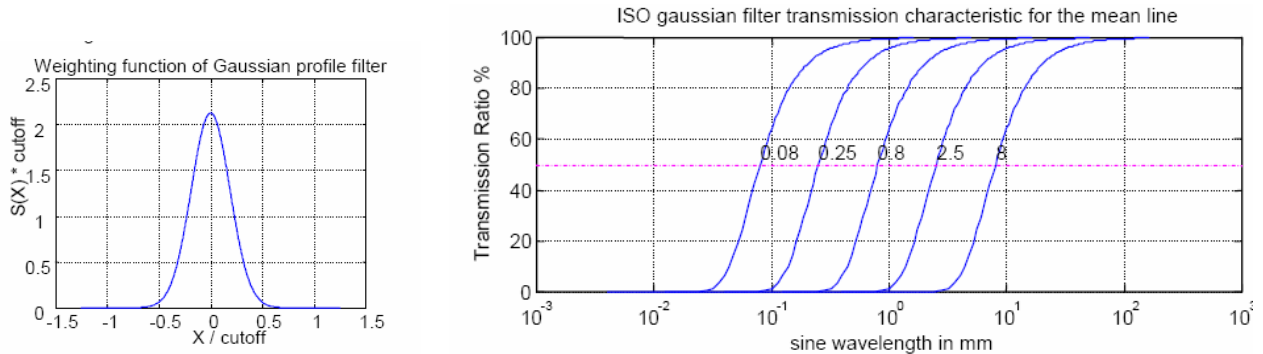
amplitúdó átviteli függvénye pedig:

$$\frac{A_{output}}{A_{input}} = \exp\left(-\pi \left(\alpha \frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2\right), \quad (3.2)$$

ahol x a helykoordináta, λ a szinuszos profil hullámhossza, λ_c a határhullámhossz (cut-off), $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} = 0.4697$, A_{input} és A_{output} pedig a bemenő és kimenő jel amplitúdója.

A Gauss-szűrő a közép vonal (hullámossági profil) meghatározásához használható – a kistérközű, nagyfrekvenciájú érdességet kiszűrő aluláteresztő – szűrő.

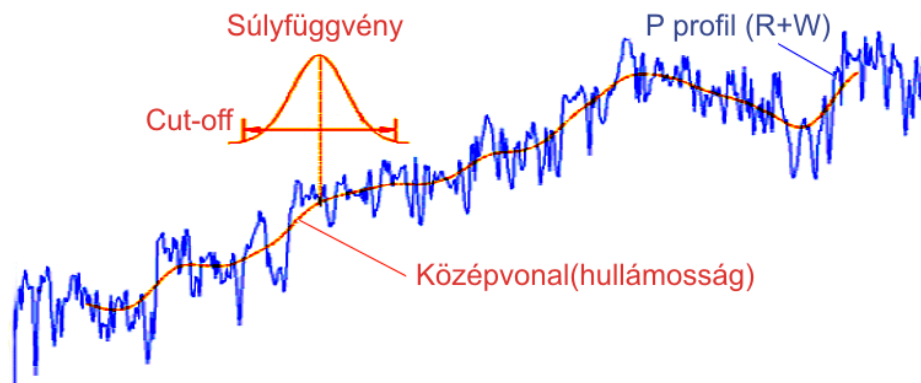
A szabványos Gauss-szűrő súlyfüggvényét és az átviteli karakterisztikákat a 3.19 ábra mutatja. Az ábrából is kitűnik, hogy az átviteli arány a cut-off-nál 50%, ebből következően ez a szűrő alkalmas az érdesség és a hullámosság egy lépésben történő értékelésére.



3.19. ábra. A Gauss-szűrő súlyfüggvénye és átviteli karakterisztikái

A Gauss-szűrő másik nagy előnye a 2RC szűrővel szemben, hogy a szimmetrikus súlyfüggvényből adódóan fáziseltolódás nem jelentkezik (3.18. ábra).

A szabvány a szűrés algoritmusára vonatkozóan előírásokat nem tartalmaz, az irodalmi utalások szerint [Wh94] a szűrés a 3.20. ábrán illusztrált módon, diszkrét konvolúciós művelettel valósul meg. Az algoritmus az érdességet és hullámosságot tartalmazó P profil (Primary profile) minden pontját a $\pm\lambda c/2$ tartományon belüli szomszédos pontjainak súlyozott átlagával helyettesíti. Az ilyen módon kiadódó közép vonal a hullámossági profil, melyhez viszonyítva az érdességi eltérések meghatározhatók.

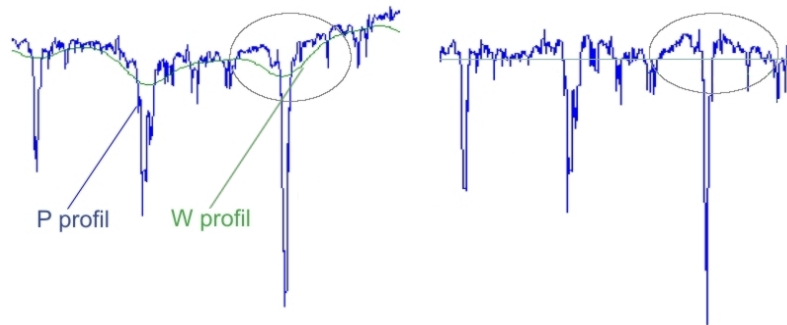


3.20. ábra. A konvolúciós szűrés

A szűrési algoritmusból következően a szabványos Gauss-szűrő a profil elején (run-up, pre-travel) és végén (run-down, post-travel) $\lambda c/2$ hosszúságú szakaszt nem tud helyesen kiértékelni, emiatt a mérési hosszak λc -vel hosszabbnak kell lennie, mint az értékelési hossz. Ez az ún. „end (edge) effect” miatti információvesztés különösen nagy hátrányt jelent a mikrotopográfiát értékelő 2D-kiterjesztésű Gauss-szűrők esetében, mert a mérési tartomány növelésének pl. az optikai elven működő műszerek esetében korlátai vannak.

A Gauss-szűrő másik jelentős hátránya a közép vonal (hullámossági profil) érzékenysége a lokális hibákra, például a sikköszörcsűlt és hónolt felületek mély árkaira. A szakirodalomban „Deep Valleys Distortion” (mély árok torzítás) nevű jelenséget a 3.21. ábra érzékelteti. A bekarikázott környezetben jól megfigyelhető, hogy a mély karc a közép vonalat jelentősen torzítja, a torzult

középvonalhoz viszonyított profilkiértékelés pedig nem a valóságos működési tulajdonságokat leíró eredményt ad. Ennek a kedvezőtlen hatásnak a kiküszöbölésére a kettős Gauss-szűréssel megvalósított eljárást, illetőleg az ún. robusztus (robust) szűrőket fejlesztették ki.



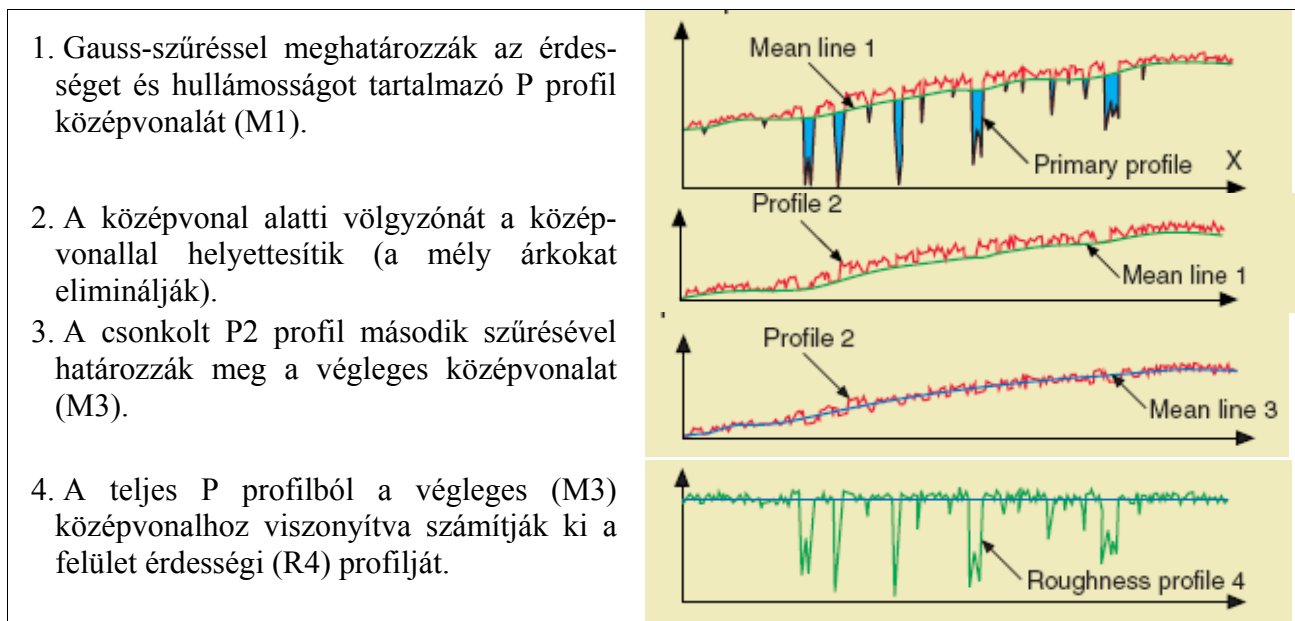
3.21. ábra. A „Deep Valleys Distortion” jelenség

A Gauss-szűrő nagyterközű egyenetlenségek (alakhiba) szűrésekor torzít (3.26. ábra), ebből a szempontból a polinomos közelítésű szűrési eljárások kedvezőbb tulajdonságúak.

A Gauss-szűrés sebességének növelésére több kutató dolgozott ki matematikai módszert [RaRa79, Kr96–2, YuQiSo00], de a Gauss-szűrő előzőekben ismertetett hátrányai miatt egyéb digitális szűrési eljárások kifejlesztésére is igény mutatkozott. Ezek egyelőre nem szabványosítottak, tesztelés alatt vannak, de egy részüket az ISO/TS 16610 ajánlás sorozat már tartalmazza.

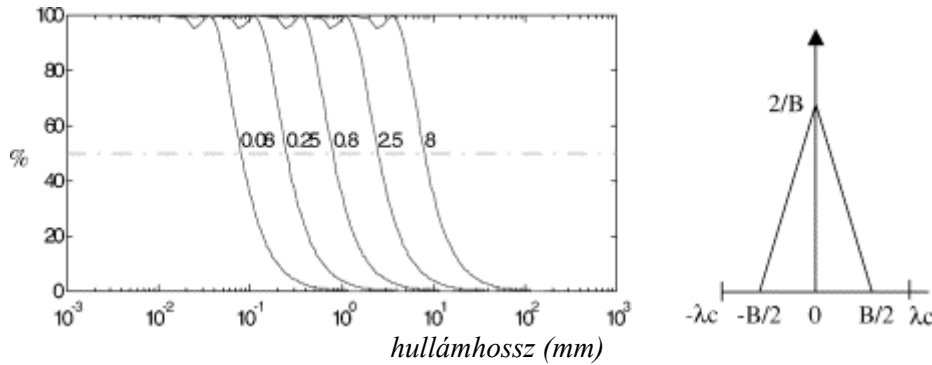
c) Az R_k szűrő

A profil mély árkai a Gauss-szűréssel kapott hullámossági profilt (középvonalat) jelentősen befolyásolják (3.21. ábra), ezáltal az érdességi profilt is torzítják, a profilból számított érdességi paraméterek értékeit növelik. A működési tulajdonságokat jellemző, és az R profil hordfelület-görbéjéből számítható R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} paraméterek emiatt nem jellemzik a tényleges tribológiai tulajdonságokat, hiszen például a hónolás során keletkezett hornyok azokat kifejezetten javítják. A probléma feloldása érdekében a német autóipar kidolgozott egy kettős szűréseken alapuló eljárást (DIN4776), amelyet az ISO is átvett (ISO 13565–1). Az eljárás lépéseit a 3.22. ábra mutatja be.



3.22. ábra. A kettős Gauss-szűrés lépései

A DIN4776 (már nem hatályos) szabvány szerinti szűrés lépései ugyanezek voltak, de háromszögű súlyfüggvényt írt elő. Az átviteli karakterisztikákat és a szűrő súlyfüggvényét a 3.23. ábra mutatja.



3.23. ábra. A DIN4776 szűrő karakterisztikája és súlyfüggvénye

A szűrő amplitúdó átviteli függvénye:

$$\frac{A_{output}}{A_{input}} = 1 - \left(\alpha \frac{\lambda}{\pi \alpha \lambda_c} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \alpha \lambda_c}{\lambda} \right), \quad (3.3)$$

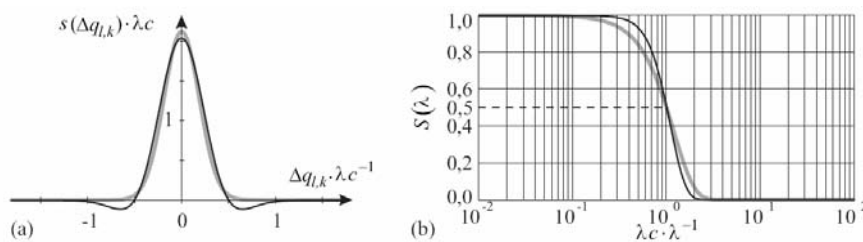
ahol $\alpha=0.44294647$ és $\alpha \lambda_c=B/2$.

A nagyon mély barázdák hatásának csökkentésére az Rk szűrő sem mindig alkalmas, és a rá-, illetve lefutási szakaszon a szűrés nem hajtható végre (end-effect).

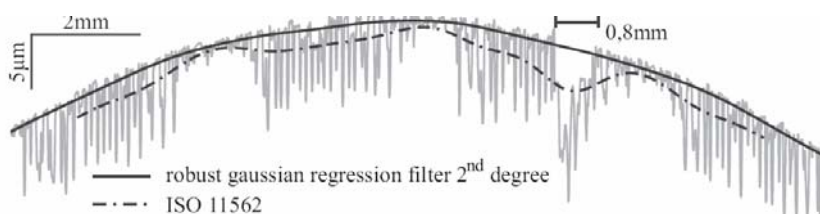
c) Robusztus szűrők

A robusztus (robust) szűrőket elsősorban a Gauss-szűrők korábban leírt torzító hatása miatt kezdték el kifejleszteni. Közös tulajdonságuk, hogy az érdesség és hullámosság reálisabb szétválasztását teszik lehetővé, redukálják a helyi egyenetlenségek (csúcsok és árkok) torzító hatását.

A Seewig által javasolt [Se05] robusztus Gaussian-regressziós szűrő súlyfüggvényét és átviteli karakterisztikáját a b) pontban tárgyalt Gauss-szűrőével (halvány vonal) összevethető módon a 3.24. ábra, a kétféle szűrővel kapott középvonalat pedig a 3.25. ábra mutatja be.



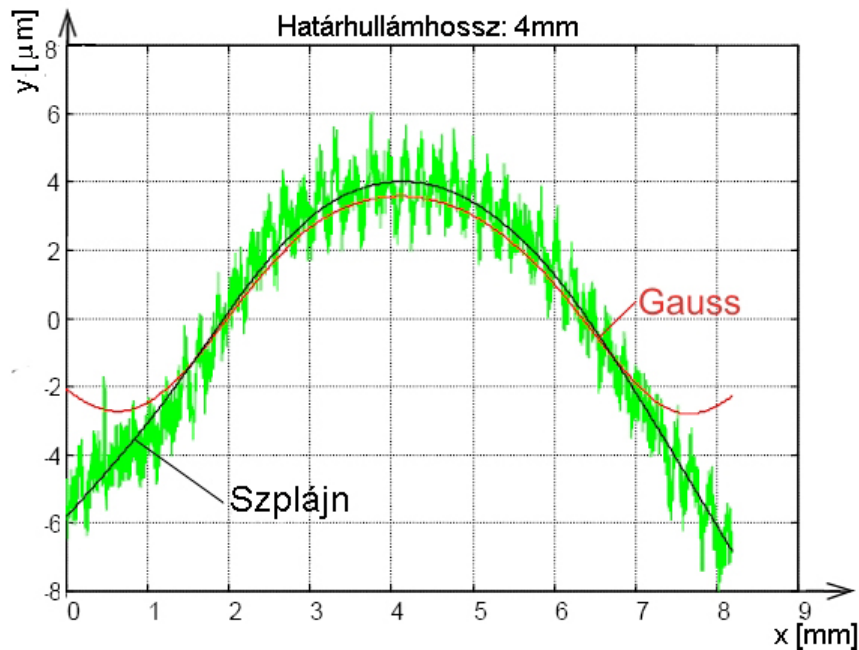
3.24. ábra. Robust Gaussian-regressziós szűrő súlyfüggvénye (a) és karakterisztikája (b) [Se05]



3.25. ábra. Robust Gaussian-regressziós és a Gauss-szűrés középvonalai [Se05]

d) Szplájn (Spline) szűrők

A szplájn szűrők az egyenetlenségek szétválasztását polinomos közelítéssel végzik [Kr96–1]. Egyszerűbb esetben, például az alakhiba leválasztásához alacsonyabb rendű polinom, például parabola megfelel. Krystek [Kr00] szerint a harmadrendű polinominális szűrő, az ún. cubic (kübös) szűrő az alakhiba mellett a hullámosság és az érdesség szűrésére is használható. Az általa ismertetett szplájn szűrő átviteli karakterisztikája alig különbözik az ISO 11562 szerinti Gauss-szűrőétől, a két szűrővel mért paraméterek között szignifikáns különbség nincs. A szplájn szűrők polinominális regresszióból adódó előnye, hogy a teljes profil kiértékelhető (3.26. ábra).



3.26. ábra. A szplájn- és a Gauss-szűrő összehasonlítása [Se05]

Az ISO/TS 16610–29 ajánlásban is publikált robusztos szplájn szűrő a Gauss-szűrő mindkét hátrányát – end-effect és torzítás – kiküszöböli.

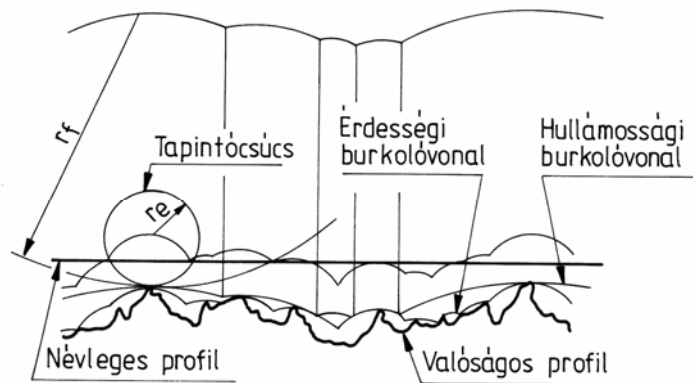
3.3.2.2 Szűrés a burkolóvonalas (E-) rendszerben

A burkolóvonalas, vagy E- (envelope) rendszerű szűrés olyan módszer, amely a topográfia tribológiai érintkezés szempontjából meghatározó csúcszónáját súlyozottabban veszi figyelembe, mint a kevésbé releváns völgyzónát. Az eltérések értelmezése a profil csúcszónájában található pontokra valamilyen módszerrel illesztett burkológörbéhez viszonyítva történik.

Az E-rendszerű kiértékelés kezdetben különböző sugarú köröknek a valamennyi eltérést tartalmazó profilon történő legördítésével származtatta a burkológörbéket (3.27. ábra).

A rendszer alap gondolata az, hogy a gördülőkör a sugarához viszonyítottan kistérközű (nagyfrekvenciás) egyenetlenségeket a geometriai viszonyokból adódóan nem képes lekövetni, azokat automatikusan kiszűri.

Az érdességet az r_e sugarú kör legördítésével kapott érdességi burkolóvonalhoz viszonyítva, a hullámosságot pedig az r_f sugarú gördülő kör által meghatározott hullámossági és az érdességi burkolóvonal közötti eltérésként értelmezték. Az r_e és r_f értékét a felület geometriájának függvényeként határozták meg.



3.27. ábra. Az érdességi és hullámossági burkolóvonal [Ho90]

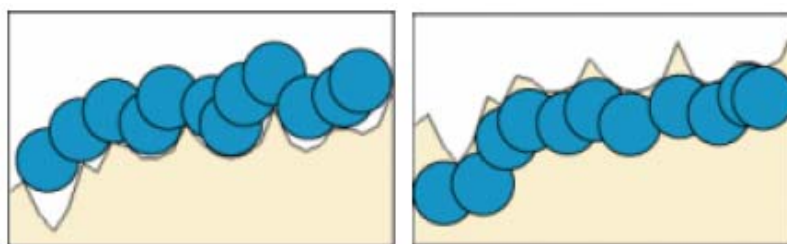
Az E-rendszerű szűrés kezdetben mechanikusan, csúszkás tapintórendszerek alkalmazásával történt. A korszerű műszerek, illetve a matematikai, informatikai háttér ma már lehetővé teszik a tetszés szerinti, matematikailag definiált geometriával megvalósított digitális szétválasztást. Ennek és a rendszer más előnyeinek köszönhetően a szakirodalomban egyértelműen megfigyelhető, hogy az egyenetlenségek szétválasztásában egyre nagyobb hangsúlyt kap a morfológiai szűrés.

a) Morfológiai szűrők

A morfológiai szűrőket a felületi mikrogeometria vizsgálata során tulajdonképpen régóta használjuk, hiszen a leggyakrabban alkalmazott metszettapintós műszerek tapintócsúcsának legtöbbször gömbsüveg alakú érintkező felülete dilatációs morfológiai transzformációt hajt végre, és a kistérközű, általában mikroérdesség kategóriájába tartozó egyenetlenségek az észlelt profilban már nem jelennek meg.

A mikrogeometria analíziséhez használt diszkrét morfológiai szűrők a felületi mikrogeometria profiladatai és a morfológiai szűrést végző ún. strukturális elem paramétereinek alapján végzik el a morfológiai transzformációkat (eróziót és dilatációt). A strukturális elem 2D-s vizsgálat esetén például lehet kör vagy egyenes szakasz, felület szűrése esetén pedig többnyire gömb.

A morfológiai transzformáció két alapműveletét, a dilatációt és eróziót kör strukturáló elem alkalmazásával a 3.28. ábra mutatja be.



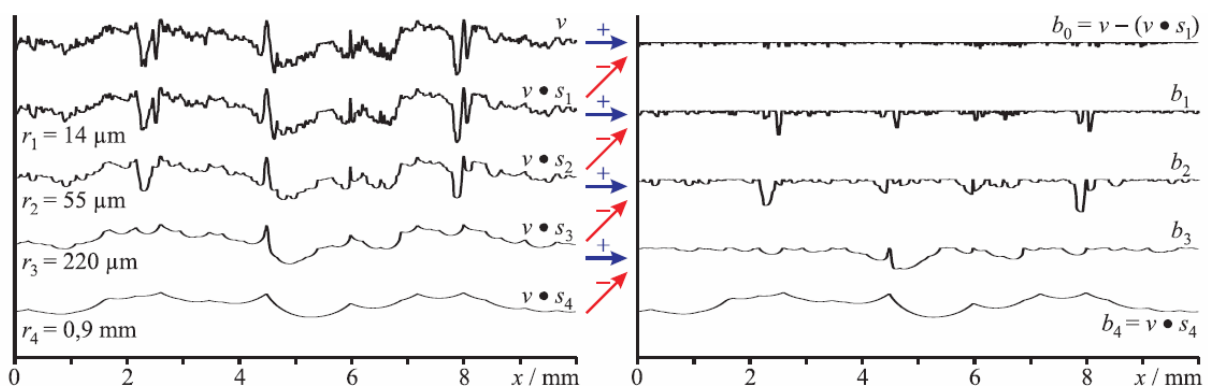
3.28. ábra. Morfológiai alapműveletek: dilatáció és erózió

A szűrési algoritmus a kör strukturális elemet a szűrendő profilon alul vagy felül „legördíti”, a kör középpontja a sugártól függő mértékben szűrt profilt írja le. A baloldali ábrán bemutatott ún. dilatáció hizlalja, míg a jobboldali ábrán bemutatott erózió fogyasztja az eredeti profílgörbével meghatározott területet.

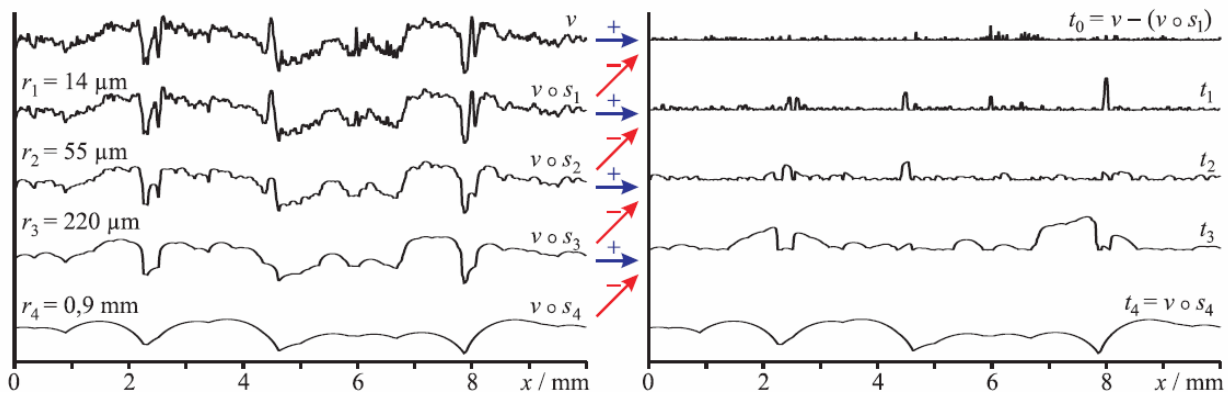
A dilatáció után végrehajtott erózió a zárás (closing), míg az erózió utáni dilatáció a nyitás (opening) kétlépéses morfológiai transzformáció. A zárás megtartja a csúcsokat, és kitölti a

völgyzőna árkait, míg a nyitás a csúcsokat eliminálja, és megtartja az árkokat. A strukturális elem geometriájának és méretének (skála) célszerű megválasztásával beállítható, hogy milyen szélességű árkok, illetve csúcsok kerüljenek ki az értékelésből. Egy adott skálájú záró (closing) szűrő eltávolítja az összes árkot, aminek a szélessége kisebb, mint a skála, egy nyitó (opening) szűrőnél pedig a csúcsokra vonatkozóan igaz mindez.

Morfológiai szűrés sorozatával a felületről részletes információkat kaphatunk. A Scott [Sc00], valamint León és Beyerer által javasolt megoldás [LeBe05] lépéseit záró morfológiai szűréssel a 3.29. ábra, nyitó szűréssel pedig a 3.30. ábra mutatja be. A v jelű szűretlen profiltól a tapintócsúc sugaránál nagyobb r_1 sugarú kör strukturális elemmel megvalósított zárás a $v \bullet s_1$, a nyitás pedig a $v \circ s_1$ profilt eredményezi. A két profil különbsége az adott szűrési tartományra jellemző $b_0 = v - v \bullet s_1$ különbség profil a jellegzetes árkokat, a $t_0 = v - v \circ s_1$ különbség profil a jellegzetes csúcsokat tartalmazza. A szűrés és különbségképzés egyre nagyobb (r_2, r_3, r_4, \dots) sugarú strukturális elemmel folytatható.



3.29. ábra. Closing transzformációk eredményeként kapott különbség-profilok [LeBe05]



3.30. ábra. Opening transzformációk eredményeként kapott különbség-profilok [LeBe05]

A morfológiai szűrés-sorozatokat tartalmazó 3.29. és 3.30. ábrák információi nagyon hasonlítanak a 3.3.2.3. pontban ismertetésre kerülő wavelet transzformációval megvalósított szűrés eredményeire.

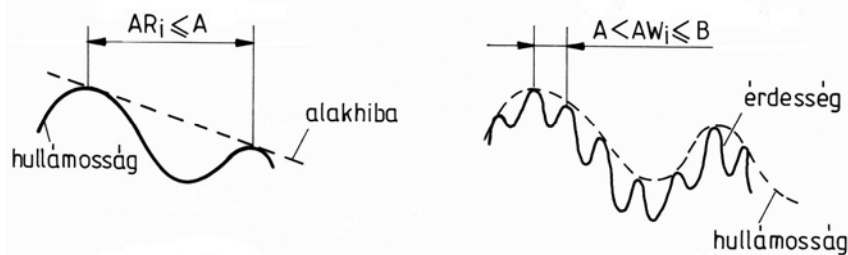
A morfológiai szűrésre vonatkozóan az ISO/TS 16610–41 szabványajánlás tartalmaz előírást. A kutatók és szoftverfejlesztők a morfológiai szűrési elvre alapozva is törekednek egyre jobb szűrési tulajdonságú eljárások kidolgozására. Kumar és Shunmugam például két különböző átmérőjű strukturális elemet alkalmazó morfológiai szűrési eljárást publikált [KuSh06]. A rádiusz kiválasztás általuk javasolt módszere biztosítja, hogy az egyenetlenségek szétválasztása elsősorban nem azok amplitudójától, hanem hullámhosszától függően valósul meg. Német kutatók, Dietzsch és társai

morfológiai szűrésre alapozott új paramétereket javasolnak a funkcionális tulajdonságok leírására [DiGeGr06]. Térbeli strukturális elem, például gömb alkalmazásával a morfológiai szűrés a térbeli felületi textúra vizsgálatára is alkalmas [LeBe05].

b) Motif kombináció

A különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásának az ún. motif kombináción alapuló módszerét a francia autóipar igényeihez igazodva az először 1969-ben kiadott NF E 05–015 francia nemzeti szabvány tartalmazta. Az új módszert több kutató is elemezte [Fa82, Sh87, Bo92], a tapasztalatok és kutatói javaslatok alapján többször átdolgozott szabvány módszerét az ISO 1996-ban vette át (EN ISO 12085). A motif módszer részletes elemzésével [Ho90] dolgozatomban már foglalkoztam, és itt ismertettem a motif kombinációs kiértékelésre nem alkalmas mérőműszerek használhatóságának kiterjesztése érdekében készített motif kiértékelő programomat is. Dietzsch és társai a nemzetközi szabvány kiadását követően vizsgálták az eljárást, és megállapították, hogy a motif módszer a középvasalás rendszer első használható alternatívája, a hullámosság és érdesség szétválasztása teljesen élesen történik, és a 7 motif paraméter alkalmas a felület működési tulajdonságainak jellemzésére [DiPaHa98].

A szabvány szerint a hullámossági profilt az érdességi profil csúcsainak, az alakprofilt pedig a hullámossági profil csúcsainak összekötésével kapjuk (3.31. ábra).



3.31. ábra. Alakhiba, hullámossági- és érdességi profil

A hullámosság olyan geometriai eltérés, amelynél a szomszédos csúcsok távolsága nagyobb, mint A , de nem nagyobb, mint B , az érdességnél pedig a szomszédos csúcsok távolsága kisebb, mint B . A motifok szélességének A és B határértékei az alábbiak lehetnek:

A[mm].	0,02	0,1	0,5	2,5
B[mm].	0,10	0,5	2,5	12,5

Egyéb előírás hiányában $A=0,5$ mm és $B=2,5$ mm, tehát a hullámosság olyan geometriai eltérés, amelynél a szomszédos csúcsok távolsága nagyobb, mint 0,5 mm, de nem nagyobb, mint 2,5 mm. Az NF E motif szabvány korábban a hullámosságként csak a $0,5\text{mm} < AW \leq 2,5\text{mm}$ hullámhosszú egyenetlenségeket definiálta. Az ISO szabványban megjelenő értelmezés bővítés oka az a 3.3.1. pontban már említett tény, hogy annak eldöntése, miszerint egy egyenetlenség hullámosságnak, érdességnek vagy alakhibának minősül, függ a vizsgált felület működésben betöltött szerepétől is [StSuDo93, Wh94].

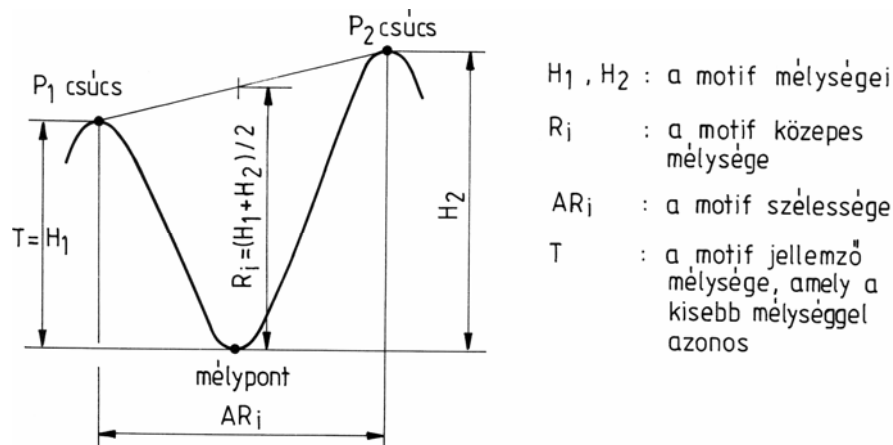
A motif profilanálízis egyik alapgondolata az, hogy a profil egyes részletei egzaktul megfogalmazott feltételek fennállása esetén figyelmen kívül hagyhatók. A 3.32. ábra egy viszonylag szabályos – például esztergált – felület profildiagramját mutatja.



3.32. ábra. A profil különböző szabálytalanságai

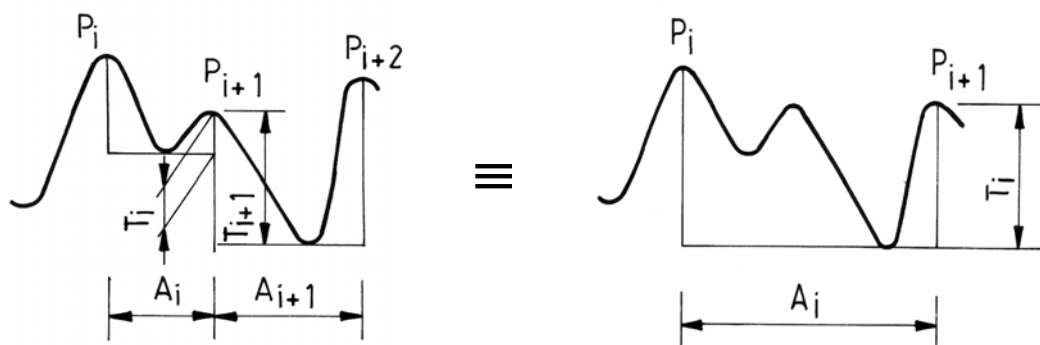
A felület jól elkülöníthető barázdákból áll, amelyek profilirányú (A_i), illetve magassági (H_i) méretükkel jól jellemezhetők. Az „A” helyen a viszonylagos szabályosságtól való geometriai eltérés figyelhető meg, de szemlélet alapján is belátható, hogy ennek a teljes profil jellegére gyakorolt hatása jelentéktelen. A „B” jelű hely szabálytalansága esetében már nem egyértelmű a döntés. A motív összevonás módszere megfogalmazza azokat a feltételeket, melyek vizsgálata a döntést egyértelművé teszi.

Motív-nak a profil két szomszédos csúcsa közti profilszakaszt nevezzük. A motív jellemzésére a 3.33. ábra szerint értelmezett paraméterek szolgálnak. (Érdességi motív esetén az R , hullámossági motív esetén a W megkülönböztetés használatos.)



3.33. ábra. Az érdességi motív jellemzői

A motívok kombinációja során azt vizsgáljuk, hogy két szomszédos motív közös csúcsa az érdességi, ill. hullámossági paraméterek számításánál figyelmen kívül hagyható-e, azaz a két szomszédos motív egy közös motív-al helyettesíthető-e. Az összevonásnak négy feltétele van, és amennyiben ezek teljesülnek, a szomszédos motívok összevonhatóak (3.34. ábra). Az összevonás feltételeit korábbi publikációkban részletesen ismertettem [Ho90, HoPa91].



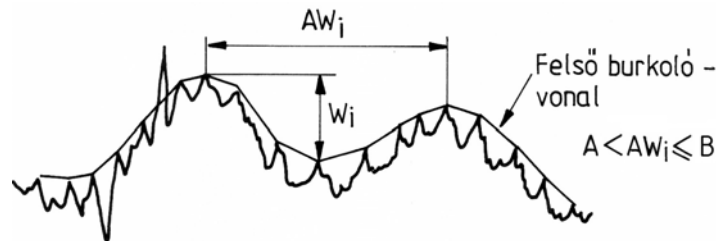
3.34. ábra. Szomszédos motívok összevonása

Az észlelt felületi profil motif kombinációja után megmaradt motifokból kapjuk az érdességi paraméterek meghatározásához szükséges AR_i és R_i méreteket (3.35. ábra), melyek az érdességi motif profilirányú, ill. magassági méretei.



3.35. ábra. Érdességi motif jellemző méretei

A megmaradt csúcsok összekötésével keletkező felső burkolóvonal a felület hullámosságára jellemző, és a motif kombináció elvégzése után ebből a hullámossági paraméterek számításához szükséges AW_i és W_i értékek határozhatók meg (3.36. ábra). Mivel egy-egy kiugró csúcs, vagy árok a magassági értékeket jelentősen eltorzítaná, Boulanger javaslata alapján [Bo83] ezen értékek statisztikai elemzésen alapuló módosítására kerül sor.



3.36. ábra. A hullámossági motif jellemző méretei

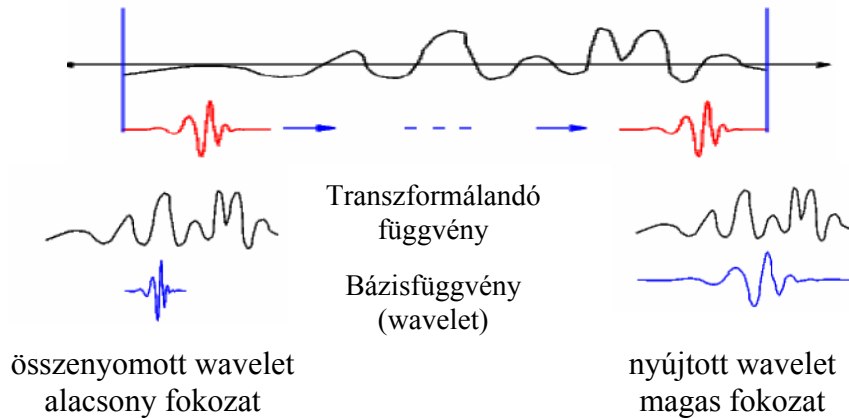
A motif alapú profil kiértékelés mára teljesen általánossá vált, a ma kapható mérőműszerek szinte mindegyike képes a mikrogeometria motif alapú kiértékelésére.

A motif módszer 3D-s kiterjesztésének lehetőségét a 3.3.4 pontban mutatom be.

3.3.2.3 Wavelet szűrés

A diszkrét wavelet transzformáció jó lehetőséget kínál, és egyre nagyobb jelentőséget kap technikai felületek megjelenítésénél és analizálásánál [RaBo98, RaMuFu02, LiSh06, BrMoFe04]. A wavelet alapú szűrés az alakhiba, hullámosság és érdesség szétválasztásának egy új lehetőségét kínálja, és különösen előnyös olyan esetekben, amikor a megmunkált felület instacionárius frekvencia összetevőkkel rendelkezik [JoBuLa02, KiKi07]. A wavelet transzformációt alkalmazzák mikro- és nanofelületek [JiBl04] és vékonyfilmek morfológiájának minősítésére [StSa05]. Használata a jelfeldolgozás különféle területein is mindinkább terjed. A módszer sikeres alkalmazásáról számolnak be az idősorok analizálásával, valamint a digitális képfeldolgozással és alakfelismeréssel foglalkozó szakirodalomban [We05, NiNaQu05, ChBaDi07, GuGu07].

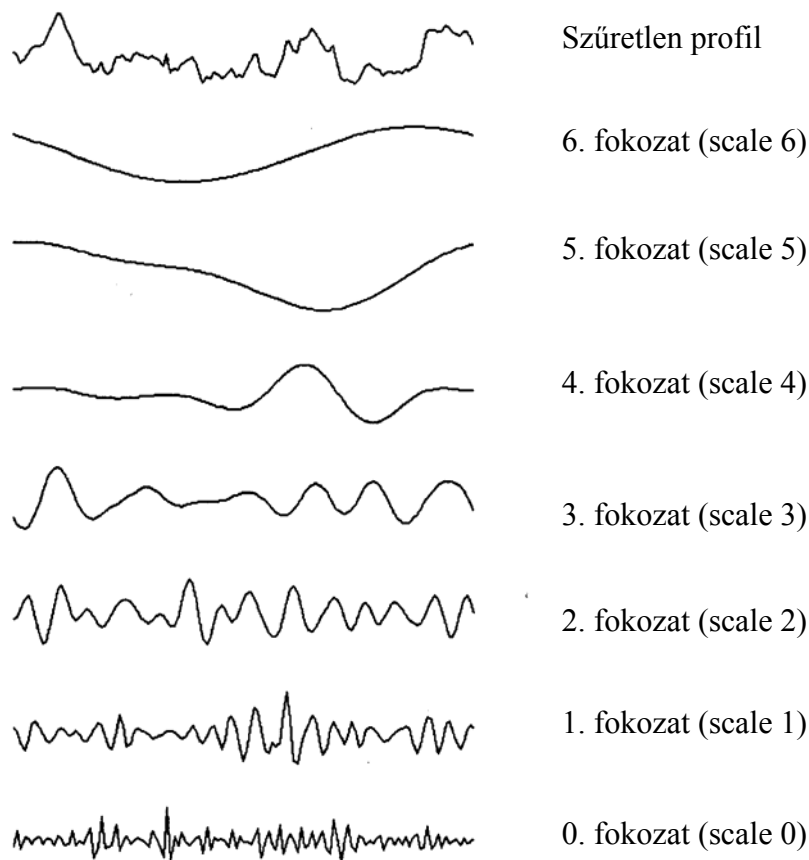
A transzformáció alapelve nagyon hasonlít a Fourier-transzformációéra, nevezetesen a transzformáció során a transzformálandó függvényt korreláljuk a bázisfüggvényekkel, így megkapjuk az adott bázisfüggvény irányába eső komponens nagyságát. A wavelet-transzformáció bázisfüggvényei olyan lokalizált függvények, hullámok (wavelet = hullámocska), melyek egy alap hullám (alap wavelet) eltolt és összenyomott változatai (3.37. ábra).



3.37. ábra. A wavelet transzformáció alapfogalmai

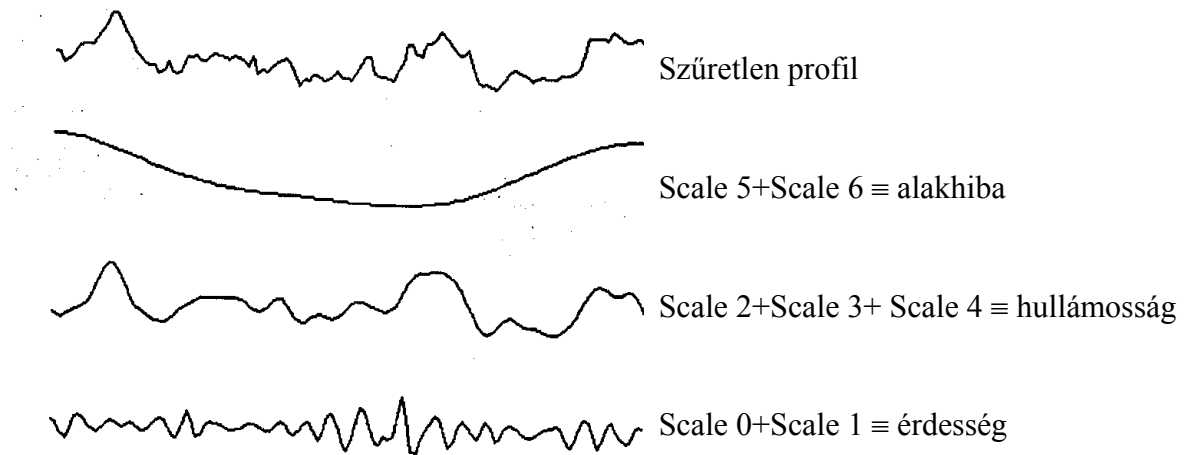
Az, hogy a bázisfüggvény a szűrt profil milyen frekvenciájú összetevőjével korrelál, az összenyomás mértékétől, fokozatától (scale) függ. Az összenyomás fokozatának megválasztásával a profil tetszőleges részletességű elemzésére van lehetőség. A profil (vagy felület) ilyen módon való elemzése hasonlít ahhoz, amikor a morfológiai szűrésnél strukturális elemek sorozatát alkalmazzuk.

Josso és társai [JoBuLa02] az alakhiba, hullámosság és érdekesség wavelet transzformációval megvalósított szétválasztására mutatnak be megoldást. A 3.38. ábra az eredeti profil 7 fokozat szerinti felbontását mutatja. A transzformációt az egyik leggyakrabban használt alaphullám, a Daubechies wavelet alkalmazásával végezték.



3.38. ábra. A wavelet transzformáció alkalmazása

A vizsgált felülettől, illetve annak funkciójától függően döntendő el, hogy a fokozatok közül melyik tartozik az érdekességhez, hullámossághoz vagy alakhibához, másképp fogalmazva az egyes eltérésekhez milyen frekvenciatartományt rendelünk (3.39. ábra).



3.39. ábra. Az egyenetlenségek szétválasztása wavelet transzformációval

A wavelet transzformáció alkalmas 3D-s, azaz mikrotopográfiai vizsgálatokra is, ezzel a kérdéssel is számos kutató foglalkozik [CoPaPe99, JiB1St01, JoBuLa02, LiSh06].

3.3.3 A digitális profil szűrők összehasonlítása

Az előző pontban leírtak összegzéséként megállapítható, hogy a szürendő felületek mikrogeometriai és funkcionális sokféleségéből adódóan egyetlen, minden probléma megoldására optimálisan alkalmas szűrési eljárás nem létezik, az adott feladattól függően kell a legcélszerűbb megoldást választani.

A 2RC szűrés hátrányai miatt várhatóan háttérbe szorul. A Gauss- és kettős Gauss-szűrést az európai és amerikai szabvány egyaránt tartalmazza, ezért az ipari felhasználást tekintve jelenleg ezek a meghatározóak. A szűrés vonatkozásában az egyik fejlődési tendenciát a Gauss szűrés hátrányos tulajdonságait kiküszöbölő középvoalás rendszerű eljárások folyamatos fejlesztése jelenti, amit a 2006-ban kiadott ISO/TS 16610 ajánlás sorozat is jelez.

A szakirodalomban megfigyelhető másik tendencia a teljesen újszerű kiértékelési technikák (morfológiai szűrés, wavelet transzformáció) egyre gyakoribb alkalmazása. Ezek a módszerek a felület minden korábbinál részletesebb analizisét teszik lehetővé, messzemenően kiszolgálják a tudományos kutatás, illetve az ipar igényeit, és várhatóan szakmai szemléletváltáshoz vezetnek. Ennek egy szemléletes példája, hogy a 3D-s mikrotopográfia mérésénél az évtizedeken át megszokott cut-off fogalom helyébe az univerzális jelentéstartalmú „nesting index” fogalom lép (3.3.4. pont). A szűrők sokszor lényegesen különböző tulajdonságaiból az következik, hogy ugyanannak a felületnek, hasonló szűrési paraméterekkel meghatározott szűrt képe (pl. hullámossága) a szűrő típusától függően jelentősen különbözik. Az egyértelműség és összehasonlíthatóság érdekében tehát a szűrési paraméterek megadásán kívül a szűrőt is specifikálni kell.

A 3.3.2 pontban ismertetett szűrők tulajdonságait a 3.6. táblázat foglalja össze. A + jel a szűrő előnyös, a – jel pedig hátrányos tulajdonságát jelöli.

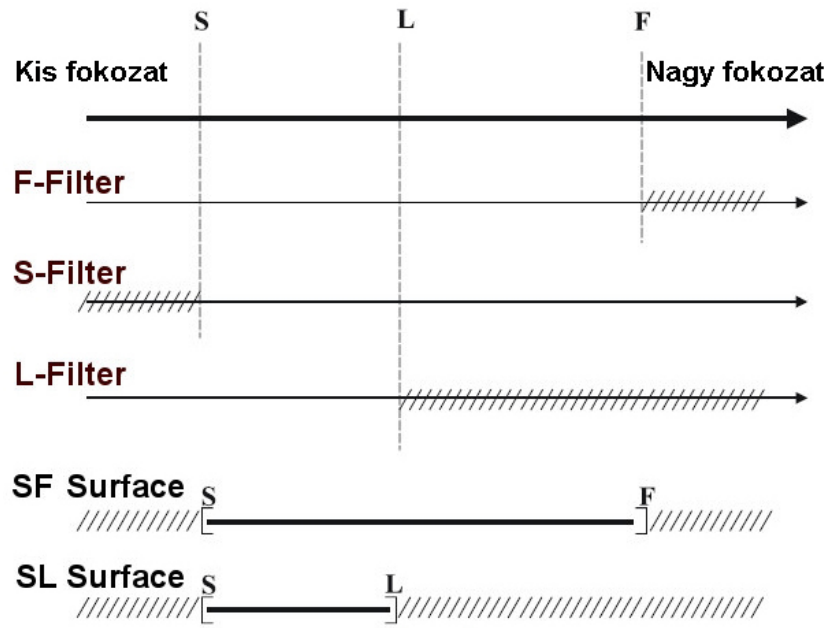
M-rendszer	2RC	<ul style="list-style-type: none"> – a 75%-os átvitel miatt $P \neq W+R$ – fáziseltolódás lép fel – Európában nem szabványos
	Gauss	<ul style="list-style-type: none"> + szabványosított + az iparban használt műszereknél a szoftverháttér rendelkezésre áll + szimmetrikus amplitúdó-sűrűségű felületeknél jól szűr + érdesség, hullámosság egy lépésben szétválasztható – end-effect hatás miatt rá- és lefutási szakasz kell – Deep Valleys Distortion, mély árkokra érzékeny – alakszűrésre kevésbé alkalmas
	Robust Gauss	<ul style="list-style-type: none"> + érdesség, hullámosság egy lépésben szétválasztható + Deep Valleys Distortion nem jelentkezik + hónolt, köszörült felületeknél különösen alkalmas – a szoftverháttér csak a legújabb műszereknél áll rendelkezésre
	Szplájn (Spline)	<ul style="list-style-type: none"> + érdesség, hullámosság egy lépésben szétválasztható + alakszűrésre különösen alkalmas + nincs rá- és lefutási szakasz – a szoftverháttér csak a legújabb műszereknél áll rendelkezésre
E-rendszer	Motif	<ul style="list-style-type: none"> + érdesség, hullámosság egy lépésben szétválasztható + nincs rá- és lefutási szakasz + kiugró csúcsok hatását eliminálja + szabványosított – a motif kombinációknál információvesztés léphet fel – működési tulajdonságokat jellemző paramétereket az eljárás nem ad
	Morfológiai	<ul style="list-style-type: none"> + nincs rá- és lefutási szakasz + strukturális elem választható + részletes analízist tesz lehetővé, a csúcs és völgyzóna külön vizsgálható + 3D-s vizsgálatokra kiterjeszhető – ipari bevezetését a szoftverháttér hiánya nehezíti, főleg a kutatást segítheti
Egyéb	Wavelet	<ul style="list-style-type: none"> + nincs rá- és lefutási szakasz + instacionárius felületek esetében különösen alkalmas + részletes analízist tesz lehetővé + 3D-s vizsgálatokra kiterjeszhető – ipari bevezetését a szoftverháttér hiánya nehezíti, főleg a kutatást segítheti

3.6. táblázat. Különböző szűrők összehasonlítása

3.3.4 Egyenetlenségek szétválasztása 3D-ben

Stout, Blunt és sok más kutató [StSuDo93, Bl03] több mint másfél évtizedes intenzív előkészítő munkáját követően az ISO/TC 213 bizottsága 2007-ben nyilvánosságra hozta az első, a mikrotopográfia 3D-s kiértékelésére vonatkozó szabványtervezetet. Az új szabvány új értelmezéseket és fogalmakat definiál, mivel a 2D-s kiértékeléshez kapcsolódó fogalmak és definíciók a mikrotopográfia kiértékeléséhez nem mindig megfelelőek. Érdekes példája ennek az évtizedeken át használt cut-off fogalma, amely az egyenetlenségeket egymástól hullámhosszuk alapján elválasztó szűrők használatából ered. Ám bizonyos szűrőknek – például a morfológiai- és a wavelet szűrőknek – semmi közük sincs a hullámhosszhoz. Ezért a cut-off kifejezést a nesting index kifejezés váltja fel. A magyarra nehezen fordítható nesting index megfelel a hagyományosan használt a lineáris szűrő cut-offjának, vagy a morfológiai szűrő strukturális elemét jellemző geometriai adatnak (pl. a gömb strukturális elem sugarának).

Az ISO/DIS 25178 a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztására szolgáló szűrőket a 3.40. ábra szerint foglalja rendszerbe. Az ábrán a ferde vonalkázás a kiszűrt térköz-tartományt jelöli.



3.40. ábra. A 3D-s szűrők viszonya [ISO/DIS 25178]

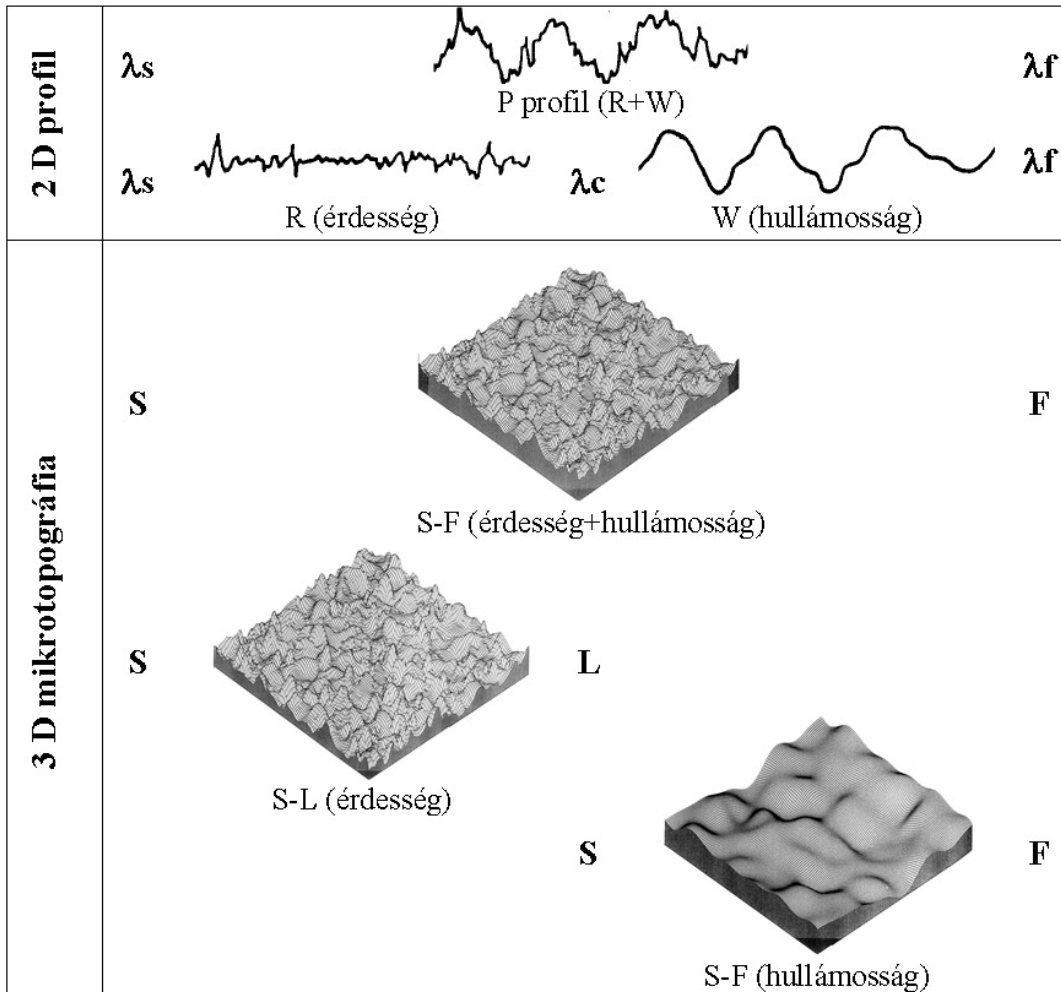
A szabványtervezet új fogalomrendszer vezet be, melynek elemei:

- Az **S-Filter (S szűrő)** a felület kisebb fokozatú , illetve lineáris szűrő esetén kisebb térközű elemeit (pl. mérési zaj, rezgés) szűri ki.
- Az **L-Filter (L szűrő)** a felület nagyobb fokozatú , illetve lineáris szűrő esetén nagyobb térközű elemeit szűri ki.
- Az **F-Filter (F szűrő)** a névleges alak leválasztására szolgáló operátor.
- Az **S-L surface (S-L felület)** az S és L szűrés után kapott felület, amit érdességi felületként értelmezhetünk.
- Az **S-F surface (S-F felület)** az S szűrés és az F operátor művelet után kapott felület. Az S szűrő nesting indexének értékétől függően érdességet és hullámosságot, vagy csak hullámosságot tartalmazó felületként értelmezhetjük.
- A **Primary surface (P felület)** az S szűrés után kapott felület.
- A **Nesting index:** a lineáris szűrő határhullámhosszának (cut-offjának), vagy a morfológiai szűrő strukturális elemének megfelelő index.

Az tervezet értelmében érdesség és hullámosság 3D-ben nem kerül külön nevesítésre és definiálásra, a 2D-s jellemzés rendszerétől eltérően P (primary), W (waviness) és R (roughness) felületet nem értelmezünk. A mikrotopográfiai jellemzők sáv szélességét a funkcionális szűrés elvét követve kell meghatározni, hiszen az alak, hullámosság érdesség fogalmak relatívak, az alak pl. bizonyos körülmények között valamelyik hullámossági vagy érdességi komponens része lehet [StSuDo93]. Az új szabványtervezet nincs szinkronban a műszergyártók által eddig követett gyakorlattal, miszerint a 3D-s felületvizsgáló műszerek mikrotopográfiai szűretlen (sP), érdességi (sR) és hullámossági (sW) paramétereket is meghatároznak.

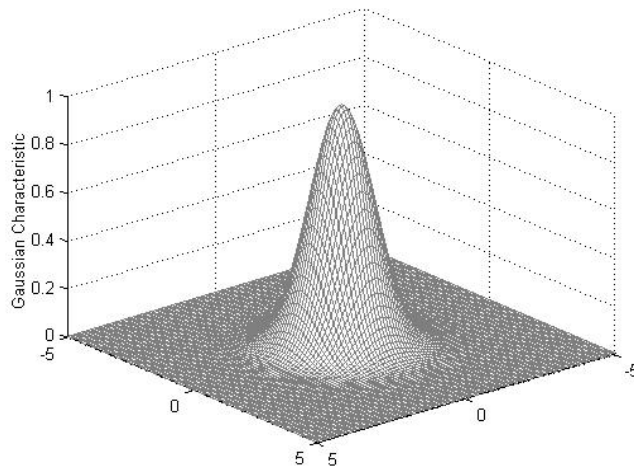
A 2D-s és 3D-s értelmezés közti kapcsolatról a 3.41. ábra nyújt áttekintést. Az S-L felület szűrt felületet jelent, és érdességi felületnek tekinthető, ha az S szűrő nesting indexe a 2D-s λ_s -nek, az L szűrőé pedig a λ_c -nek felel meg. Az S-F felület a 2D-s érdességet és hullámosságot tartalmazó P profil 3D-s megfelelője, ha az S szűrő nesting index-e a λ_s -el azonos, de hullámosságként értelmezhetjük, ha az S szűrő nesting index-e a λ_c -nek felel meg.

A mikrotopográfia szűrésére is sokféle eljárást dolgoztak ki, a morfológiai szűrés és a wavelet transzformáció mikrotopográfiai vizsgálatokban való alkalmazhatóságáról a 3.3.2. pontban volt szó.



3.41. ábra. A 2D-s és 3D-s szűrők viszonya

Stout és társai szerint a Gauss-szűrő ideálisan megfelel strukturális jellemzőkben gazdag felületek szűrésére, míg olyan esetekben, ahol a szigorú frekvencia szelektivitás az elvárás, az ún. zónaszűrő használatát javasolják [StSuDo93]. A 2D-s Gauss-szűrő átviteli karakterisztikájának képét a 3.42. ábra mutatja.



3.42. ábra. A 2D-s Gauss-szűrő átviteli karakterisztikája [YuPiXu]

A Gauss-szűrő 50%-os határhullámhossz átviteli értékéből adódóan a kis-, illetve nagytérközű egyenetlenségek – a 2D-s analógiát követve érdesség és hullámosság – felületi pontjai egy szűrést követően egyszerű különbségképzéssel meghatározhatóak.

Hanada és társai a közelmúltban [HaSaHa08] a 3D-s felületi textúra szűrésére robusztus digitális szűrést fejlesztettek ki [HaSaHa08]. A szűrő a hagyományos konvolúciós eljárás helyett frekvencia analízist használ, tetszőleges amplitúdó átviteli karakterisztika valósítható meg az end-effect hatás kiküszöbölése mellett.

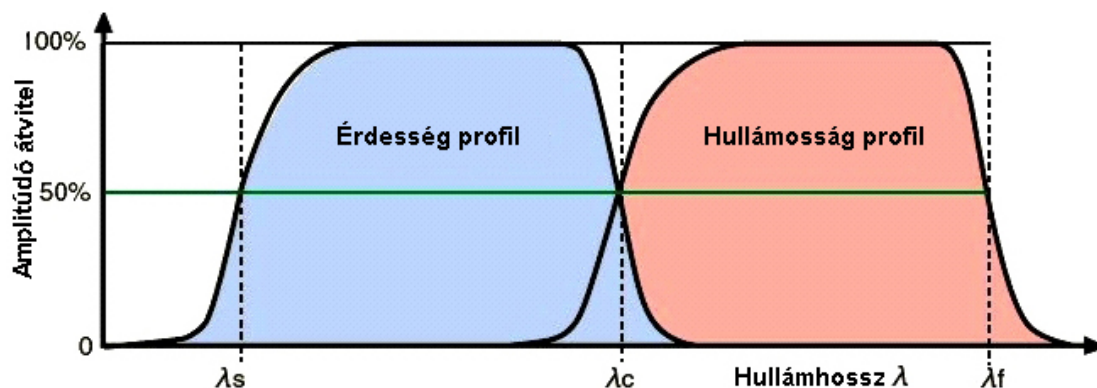
3.4 A szabványos 2D-s szűrés ellentmondásai

3.4.1 „Ellentmondásos” felületek értékelése

A mikrogeometria mérésének és kiértékelésének menetét hozzávetőlegesen egy évtizede nemzetközi szabványok írják elő. E fejezetben az érvényes szabványelőírások olyan hiányosságaira, illetve ellentmondásaira szeretnék irodalmi adatok és saját eredmények alapján rámutatni, amelyek az egységes értelmezés és értékelés gátjai.

Az EN ISO 4287 szabvány az érdességi és hullámossági profil meghatározásához három szűrőt definiál (3.43. ábra):

- A λ_s profilszűrő azokat a λ_s -nél rövidebb hullámhosszú egyenetlenségeket (zaj, rezgés, stb.) szűri ki, amelyeket az érdesség kiértékelése során nem kell figyelembe venni.
- A λ_c profilszűrő az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló szűrő, határhullámhossza λ_c .
- A λ_f profilszűrő az alakhiba leválasztására szolgál, a λ_f -nél nagyobb hullámhosszú egyenetlenségeket választja le.



3.43. ábra. A különböző rendű egyenetlenségek szétválasztása

A hullámosság kiértékelése szempontjából ugyan nincs jelentősége, de megjegyzendő, hogy a λ_s szűréssel kapcsolatban a szakmai álláspontok nem egységesek. A német autóipar szakembereinek véleménye szerint a λ_s -nél kisebb hullámhosszú egyenetlenségek kiszűrése nem megengedhető információvesztést jelent, a P és R profilból származtatott paramétereket torzítja. Emiatt a VDA2006 ágazati szabvány a λ_s szűrést tiltja.

Az ISO szabvány az alakhiba kiszűrésének λ_f határhullámhosszára vonatkozó előírást nem tartalmaz, a gyakorlatban a makrogeometriai eltérés kiszűrése a hullámosság értékelési szakaszának (l_w =sampling length) megválasztásával történik. Az 3.2.4 pontban ismertettem különböző technológiákkal legyártott felületeken végzett méréseim alapján az alakszűrés határhullámhosszára vonatkozó következtetésem, miszerint a $\lambda_f/\lambda_c=10$ viszony a hullámosságot jól jellemző profilt

eredményez. Egy amerikai műszergyártó [wPr] pontosan ennek az értéknek szabványosítását valószínűsíti ($\lambda f = l_w = 10 \cdot \lambda c$).

A kiértékelés szempontjából meghatározó jelentőségű az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló λc határhullámhossz (cut-off). Az előzőekben már bemutatott 3.14. ábra jól érzékelteti, hogy szomszédos cut-off érték választása is teljesen más hullámossági profilt eredményez.

A cut-off értékeket a mérendő felület finomságától függően az ISO EN 4288 szabvány írja elő (3.7. táblázat). A λc megegyezik az l_r értékelési szakasszal (alaphossz), amelynek segítségével az érdességi paraméterek jelentős részét értelmezhetjük. Az értékelési hossz az alaphossz többszöröse, az érdességmérés értékelési hossza általában $l_n = 5 \cdot \lambda c$.

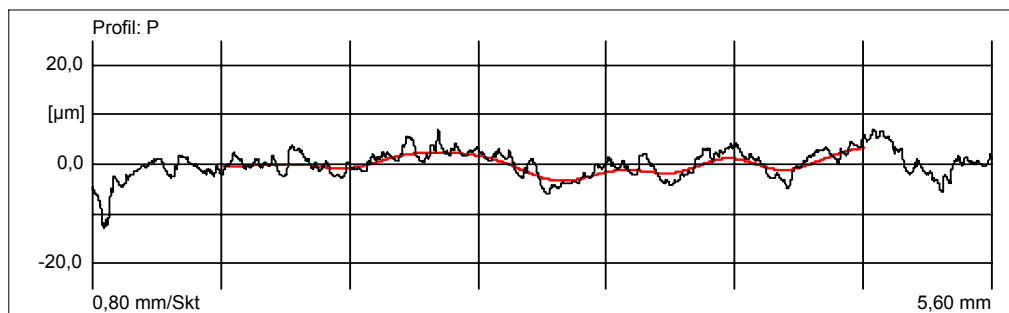
Periodikus profil	Nem-periodikus profil		cut-off	alaphossz/értékelési hossz
RSm (mm)	Rz, Rz1max (μm)	Ra (μm)	λc (mm)	l_r/l_n (mm)
$0.013 < RSm \leq 0.04$	$Rz, Rz1max \leq 0.1$	$Ra \leq 0.02$	0.08	0.08/0.4
$0.04 < RSm \leq 0.13$	$0.1 < Rz, Rz1max \leq 0.5$	$0.02 < Ra \leq 0.1$	0.25	0.25/1.25
$0.13 < RSm \leq 0.4$	$0.5 < Rz, Rz1max \leq 10$	$0.1 < Ra \leq 2$	0.8	0.8/4
$0.4 < RSm \leq 1.3$	$10 < Rz, Rz1max \leq 50$	$2 < Ra \leq 10$	2.5	2.5/12.5
$1.3 < RSm \leq 4$	$50 < Rz, Rz1max \leq 200$	$10 < Ra \leq 80$	8	8/40

3.7. táblázat. Cut-off értékek az érdességi paraméterek függvényében

A 2D-s mérések elvégzésénél a cut-off értékét (λc), valamint az azzal összefüggő értékelési szakaszt ($l_r = \lambda c$) és értékelési hosszt ($l_n = 5 \cdot \lambda c$) a vizsgált felület várható érdességi értékei (RSm, Rz, Rz1max, Ra) alapján kell kiválasztani. Ha a mérések elvégzése után a kapott eredmények nem esnek bele a értékelési hosszhoz tartozó intervallumokba, akkor a mérést egy másik cut-off alkalmazásával meg kell ismételni. Tehát csak az első mérés elvégzése után derül ki, hogy jól sikerült-e megválasztani az értékelési hosszt, a szűrési beállítást.

Szerzőtársaimmal több korábbi publikációban már beszámoltam olyan ellentmondásos esetekről, amelyeknél a felületeket jellemző paraméterek megállapítása problémákba ütközött [HoCz06–3, FeHoCz07], a következőkben ezekre az ellentmondásokra világítok rá.

A 3.44 ábra egy viszonylag durva, mart felület szüretlen profilját mutatja a középvonallal (hullámossággal).



3.44. ábra. Mart felület szüretlen profilja a hullámossági profillal

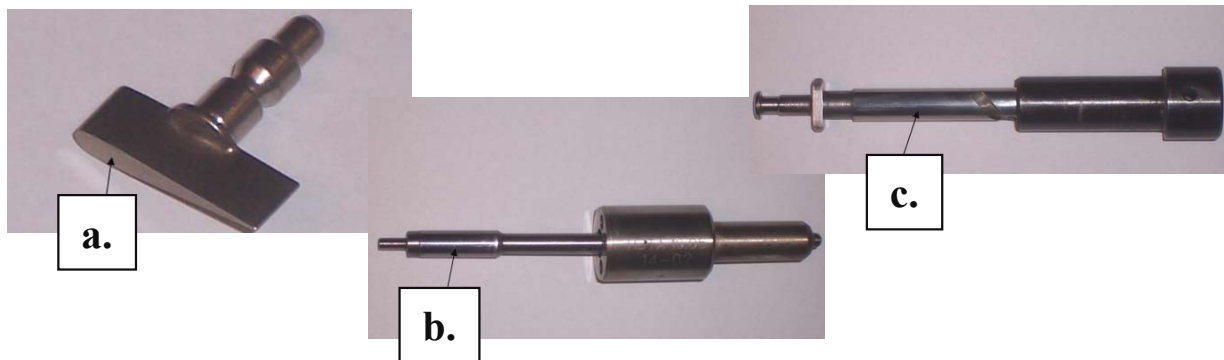
A mart felület 0,8 mm-es és 2,5 mm-es szűrőkkel mért szabványos érdességi paramétereit 3.8. táblázat tartalmazza. A táblázat megadja az adott szűréshez tartozó (ISO) érdességi paraméter értéktartományokat is. Mind a 0,8-as, mind a 2,5-ös szűrő esetén azt tapasztaljuk, hogy a kapott Ra,

Rz, Sm paraméterek a szabvány által előírt tartományba esnek, azaz mindkét mérés a szabványban rögzítetteknek megfelelően történt. Ugyanakkor a mérési eredmények, az érdességi jellemzők közel 300%-os eltérést mutatnak.

λ_c [mm]	Ra mért [μm]	Ra ISO [μm]	Rz mért [μm]	Rz ISO [μm]	RSm mért [mm]	RSm ISO [mm]
0,8	1,185	0,1 – 2	6,448	0,5 – 10	0,213	0,13 – 0,4
2,5	3,284	2 – 10	19,579	10 – 50	0,613	0,4 – 1,3

3.8. táblázat. Szabványos érdességmérés eredménye $\lambda_c=0,8$ és $\lambda_c=2,5$ szűréssel

Hasonló vizsgálatokat elvégeztünk finomabban megmunkált felületeken is. Turbófeltöltő lapát, porlasztó csúcs és üzemanyag adagoló (3.45. ábra) működő, a tervezés során előírt felületi érdességgel rendelkező, az ábrán mutatóvonallal jelölt felületeinek analizésekor ugyancsak ellentmondásos eredmények jelentkeztek.



3.45. ábra. Turbófeltöltő lapát (a), porlasztó csúcs (b), üzemanyag adagoló (c)

A vizsgálatok során beállított és mért értékeket a 3.9. táblázat foglalja össze. A mérési eredményeket megvizsgálva szembevető eltéréseket láthatunk. Valamennyi jellemző, így gyakorlatban legtöbbször használt átlagos felületi érdesség és az egyenetlenség magasság értékek ugyanazon munkadaraboknál esetenként jelentős eltéréseket is mutatnak, miközben minden mérés az 3.7. táblázat alapján szabványos vizsgálatnak tekinthető.

Alkatrész	a)		b)		c)		Paraméter hányados (PH)
	rövid	hosszú	rövid	hosszú	rövid	hosszú	
λ_c (mm)	0,25	0,8	0,08	0,25	0,08	0,25	
lt (mm)	1,75	5,6	0,56	1,75	0,56	1,75	
Ra (μm)	0,088	0,217	0,013	0,021	0,015	0,022	1,85
Rz (μm)	0,463	1,379	0,088	0,166	0,086	0,151	2,21
Rt (μm)	0,579	1,908	0,129	0,206	0,106	0,249	2,41
W _a (μm)	0,178	0,101	0,013	0,006	0,005	0,006	0,74
W _t (μm)	0,609	0,434	0,070	0,029	0,023	0,027	0,77
Pa (μm)	0,308	0,327	0,020	0,022	0,018	0,022	1,13
Pt (μm)	2,266	2,835	0,156	0,252	0,124	0,252	1,63

3.9. táblázat. Mérési eredmények és paraméter hányadosok

A táblázat jobboldali oszlopában szereplő PH „paraméter hányados” a mérési feltételek (λc határhullámhossz és l_t mérési hossz) változásának az egyes paraméterekre gyakorolt hatását fejezi ki:

$$PH = \frac{\frac{a_h}{a_r} + \frac{b_h}{b_r} + \frac{c_h}{c_r}}{3}, \quad (3.4)$$

ahol a_h , b_h és c_h az a), b) és c) jelű alkatrészek hosszú értékelési hossz és hosszú cut-off esetén mért paramétereit jelenti, az r index pedig a rövid mérési szakaszra és az ahhoz tartozó kisebb cut-off értékre utal. Az 1-nél nagyobb paraméter hányados azt jelenti, hogy a vizsgált paraméter nagyobb mérési hossz és nagyobb szűrési határhullámhossz esetén növekszik, az 1-nél kisebb hányados pedig a paraméter csökkenésére utal. A változás mértéke a paraméter hányados 1-től való eltéréseivel arányos.

A paraméter hányadosok elemzése alapján az alábbi megállapításokat tehetjük:

- A hullámosság magassági paramétereit (W_a , W_t) kivételével a vizsgált paraméterek nőnek. A hullámosság magassági paramétereinek átlagos csökkenése egyértelműen a nagyobb határhullámhosszra vezethető vissza. A korábbiakban tárgyalt 3.14 ábrán jól nyomon követhető, hogy a nagyobb határhullámhosszal megvalósított szűrés a hullámossági profilt nagyobb mértékben simítja, a profil laposabbá válik, és ebből adódóan a hullámosság magassági paramétereit csökkennek.
- Az érdesség magassági paramétereit (R_a , R_z , R_t) a nagyobb mérési hossznál lényegesen nagyobbra adódnak, aminek oka
 - egyrészt a nagyobb határhullámhosszból következő laposabb középvonal (hullámossági profil),
 - másrészt elsősorban az R_z és R_t esetében az, hogy nagyobb mérési szakaszon nagyobb valószínűséggel fordulnak elő magasabban, illetve mélyebben fekvő profilpontok.
- A szűretlen P profil átlagos magassága (P_a) alig nő ($PH=1,13$), a P_t érték nagyobb növekedésének oka pedig valószínűleg hasonló, mint az R_z és R_t esetében.

3.4.2 Összegzés, javaslatok

Az elvileg szabályosan elvégzett kiértékelések eredményeinek jelentős különbözősége felveti a mérési hossz/szűrési beállítás újradefiniálásának kérdését. Az, hogy a mérési hossz meghatározására szolgáló paraméterek maguk is függenek a mérési hosszától, bizonyos esetekben nem tesz lehetővé objektív, egzakt kiértékelést. Számos neves szakember éppen ezen bizonytalanságok miatt fordult a motív vagy fraktál alapú kiértékeléstechnika felé [ThRoAm99, ZaAsVa01].

Ugyanakkor a korábbiakban már bemutatott elterjedtsége miatt arra nem lehet számítani, hogy a paraméter alapú kiértékelés az ipari gyakorlatban belátható időn belül visszaszorul. Ezért a kiértékelés megbízhatósága érdekében olyan megoldásokat kell találni, amelyek a mérések eredményeit egyértelművé és összehasonlíthatóvá teszik. Az alábbiakban megfogalmazott javaslatok ennek a célnak az eléréséhez járulhatnak hozzá:

- A felületet célszerű a szűretlen profil (P profil) paramétereivel jellemezni, ilyen módon kizárva a szűrésből fakadó hibalehetőséget. Annak eldöntése, hogy a P paraméter az adott felületet megfelelően jellemzi-e, az elvárt működési tulajdonságok ismeretében természetesen a konstruktőr feladata. Ez a megoldás a jelenlegi szabványkörnyezetben megvalósítható, és előnye az is, hogy a működési tulajdonságokat sok esetben jelentősen befolyásoló nagytérközű egyenetlenségek (hullámosság) kiszűrésére nem kerül sor.
- A cut-off értékének egy szűrés után kapott érdességi paraméter (R_{Sm} , R_z , R_{z1max} vagy R_a) előzetes „megbecslése” alapján történő megválasztása helyett célszerű lenne, ha a felület

olyan jellemzője lenne a kiértékelés alapja, mely független, vagy lényegesen kevésbé függ a mérési beállításoktól. Ez első lépésként a szűretlen P profil valamelyik, vagy több paramétere lehetne. Ez a javaslat szabványmódosítást vagy kiegészítést igényel.

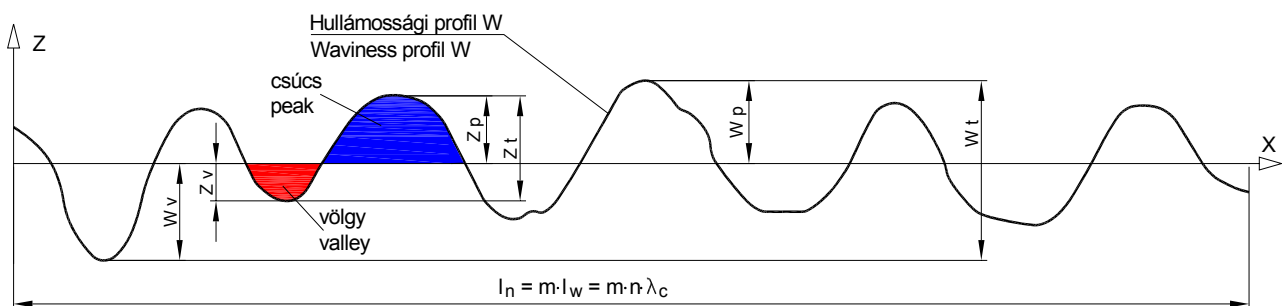
- A jelenlegi szabványkörnyezetben amennyiben az érdesség és hullámosság szétválasztására szükség van, elő kell írni a szűrés meghatározó paramétereit, mindenképp a cut-off értékét. Az előzőekben bemutatott kísérletek ugyanis egyértelműen bizonyítják, hogy a szabványra való utalás nem elegendő, a szabványoknak megfelelően végrehajtott mérések eredményei között akár több száz %-os különbségek is előfordulhatnak.
- A λ_f határhullámhosszra és ezzel együtt hullámosság értékelési szakaszára (l_w), valamint az értékelési hosszra vonatkozó előírásokkal a szabványokat ugyancsak ki kell egészíteni. Mérésekkel alátámasztott javaslat:
 $\lambda_f = l_w = 10 \cdot \lambda_c$ és $l_n = (1 \div 2) \cdot l_w$ (ld. 3.4 táblázat).

3.5 A hullámosság jellemzése

3.5.1 A hullámosság 2D-s paraméterei

A hullámosság 2D-s jellemzése a hullámossági profilból származtatott paraméterekkel történik. A hullámossági profil 3.3.2.1. pontban ismertetett középvonalas rendszerben az érdességet és alakhibát sem tartalmazó szűrt profil, illetve az E-rendszerben például a motif kombinációk módszerével meghatározott hullámossági burkolóvonal (ld. 3.3.2.2. pont).

A mikrogeometria középvonalas rendszerben értelmezett paramétereit az EN ISO 4287 szabvány definiálja. A hullámossági profil kiértékelése a λ_f alakszűréssel kapott profilhoz viszonyítva történik, melyet a 3.46. ábra „kiegyenesítve” ábrázol. Az e fölötti rész a hullámossági profil csúcsonája, az alatta lévő pedig a völgyzóna.



3.46. ábra. A hullámossági profil, a kiértékelési hossz (l_n) és a W_t paraméter

A hatályos ISO szabványok nem tartalmaznak konkrét előírást az l_n értékelési hosszra (evaluation length), és az l_w hullámossági értékelési szakaszra (sampling length) vonatkozóan. Az l_w értékelési szakaszt az alakszűrő λ_f határhullámhosszával azonos értékűre kell választani, de a λ_f értéke nincs előírva. A 3.2.4. pontban leírtak alapján λ_f értékét (ezzel a hullámosság l_w értékelési szakaszt) célszerű a λ_c érdességi cut-off tízszeresére választani. A λ_f és λ_c értékét a rajzon elő kell írni. Ugyancsak előírandó, hogy az értékelési hosszban belül hány értékelési szakasz van (például a W_a átlagos hullámosság előírásának módja $m=2$ esetén: $W_a/2$). Az érdességmérés során az értékelési hosszban öt értékelési szakaszt kell tartalmaznia. A hullámosságmérésre vonatkozóan ilyen előírás nincs, és mivel a többszörös l_w választás nagyon nagy vontatási hosszt igényelne, az ipari gyakorlat egy kiértékelési szakaszt használ ($l_n = l_w$). A hullámosság előírásának szabályait részletesen a 3.5.3. pontban mutatom be.

A hullámossági profilból származtatható hullámossági paramétereket a 3.10. táblázat foglalja össze, annak feltüntetésével, hogy az adott paraméter az l_n értékelési hossz, illetve az l_w értékelési szakaszon kerül meghatározásra. (A $W_{\Delta q}$ helyett a W_{dq} , a $W_{\delta c}$ helyett pedig a W_{dc} jelölés használata megengedett.)

Magasság irányú									Víz- szintes	Hibrid (alak)	Működési tulajdon- ságokat jellemző		
csúcs-völgy					átlag								
W_p	W_v	W_z	W_c	W_t	W_a	W_q	W_{sk}	W_{ku}	W_{Sm}	$W_{\Delta q}$	$W_{mr(c)}$	$W_{\delta c}$	W_{mr}
l_w	l_w	l_w	l_w	l_n	l_w	l_w	l_w	l_w	l_w	l_w	l_n	l_n	l_n

3.10. táblázat. A hullámosság középvas paraméterei

A paraméterek értelmezését az 1. melléklet tartalmazza, itt csupán a leggyakrabban előírt, és az amerikai szabványban egyedülként definiált W_t hullámosság magasság paraméterre térek ki. A csúcsok középvasaltól mért magasságát a 3.46. ábra a szabvánnyal összhangban Z_p -vel, a völgyek mélységét Z_v -vel jelöli. A W_t a legnagyobb csúcsmagasság (W_p) és legnagyobb völgymélység (W_v) összege, vagyis a hullámossági profil értékelési hosszban belüli legmagasabb és legalacsonyabb pontjának távolsága. Több értékelési szakasz ($m=l_n/l_w \geq 2$) esetén az értékelési szakaszon belüli legnagyobb magasságkülönbség jele W_z , ami kisebb vagy egyenlő mint W_t .

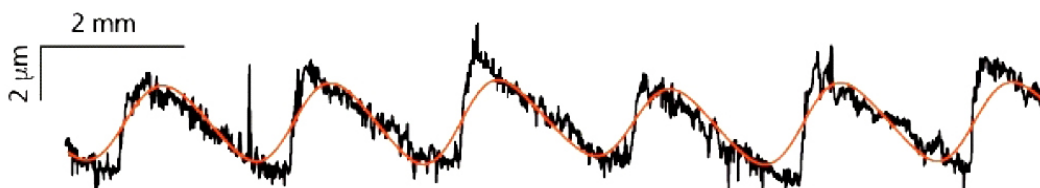
A motív paraméterek meghatározásának módját az EN ISO 12085 szabvány írja elő, a paraméterek számítása a 3.36. ábra szerinti hullámossági motívok jellemző méretei alapján történik. A kiértékelési hossz értéke a szabványból választandó A-B határértékpártól (ld. 3.2.2.2. b) függ. Értéke az alapesetnek tekintendő $A=0,5\text{mm}$ és $B=2,5\text{mm}$ határértékek mellett $l_n=16\text{mm}$ (3.11. táblázat).

A[mm].	0,02	0,1	0,5	2,5
B[mm].	0,10	0,5	2,5	12,5
l_n [mm].	0,64	3,2	16	80

3.11. táblázat. A motív kiértékelés értékelési hossza (l_n) az A-B határértékektől függően

A motív hullámossági paraméterek (W , W_x , AW , W_{te}) definícióit az 1. melléklet tartalmazza.

A nemzetközi szabványokban definiált középvasalt és motív paraméterek mellett a VDA 2007 német autóiipari szabvány egy további hullámossági fogalmat, az ún. domináns hullámosságot (dominante Welligkeit) is bevezet. A domináns hullámosság (WD), melynek meghatározása frekvenciaanalízissel történik a P profil legnagyobb amplitudójú periodikus összetevőjét jelenti, és ez egyes alkatrészek tömítési-, kopási- és zajkeltési tulajdonságait jelentősen befolyásolja. A domináns hullám W_{DSm} hullámhossza nem lehet kisebb, mint $0,02\text{mm}$, és nem lehet nagyobb mint az értékelési hossz ötöde: $0,2\text{mm} \leq W_{DSm} \leq l_n/5$. Ha a felület, illetve a vizsgált profil nem tartalmaz ebbe a tartományba eső periodikus összetevőt, akkor annak a felületnek nincs domináns hullámossága. Domináns hullámosságot okozhat például a szerszám geometriája és a megmunkálás paraméterei (3.47. ábra).

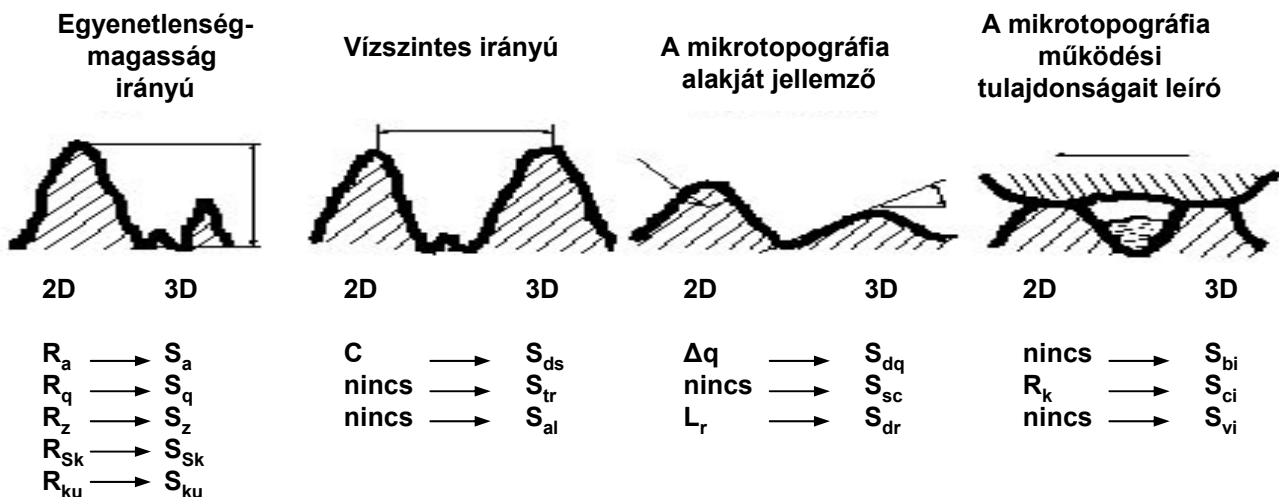


3.47. ábra. Mart felület P profilja és domináns hullámossága (WD)

A domináns hullámosság jellemzésére három paraméter (Wdt, Wdc, WDSm) szolgál, melyek értelmezését szintén az 1. mellékletben foglaltam össze.

3.5.2 A hullámosság 3D-s jellemzése

Stout [StSuDo93] számolt be az 1992-ben megrendezett „*The Newest Developments in Surface Topography*” konferenciáról, melyen ipari és tudományos körök egyaránt képviseltették magukat. A konferencián egyértelműen megfogalmazódott, hogy a 3D-s technika adta lehetőségek kihasználásával szükség van a mikrotopográfia részletes feldolgozására. Magyar kutatók [KoPa99, KoWi00] is rámutattak arra, hogy a felületi mikrotopográfiák nem képezhetők le egy-egy profil 3D-be történő kihúzásával. Az izotróp és anizotróp textúrájú felületek 3D-ben történő értelmezésével olyan információkhoz juthatunk, melyről a 2D-s technika nem képes tájékoztatást adni. Ezt az információtöbbletet jól szemléltette a [KoPa99, KoWi00] cikkekben megjelent paraméterlista (3.48. ábra), mely összefoglalta a 2D-s és az akkori állapot szerinti 3D-s (nem szabványosított) paramétereket. A 2D-s mérések hiányosságát hangsúlyozta Spedding [Sp96] és Zahouani [ZaAsVa01] is. Véleményük szerint a működési viselkedés és a felületi topográfia közötti összefüggések feltárására kizárólag 3D-s vizsgálatokkal van lehetőség.



3.48. ábra. A mikrogeometria és a mikrotopográfia kezdeti paramétereit [KoPa99]

A mikrotopográfia 3D-s jellemzésére vonatkozó elfogadott szabványok még ma sincsenek, a kutatás és az ipari gyakorlat által egyre elterjedtebben használt módszerek kutatói javaslatok, szoftver-, illetve műszerfejlesztések eredményeképpen váltak elérhetővé a kutatás és az ipari gyakorlat számára.

Az első 3D-s műszerek gyártói kezdetben olyan jellemzési módszereket javasoltak, amelyek főként a 2D-s módszerek egyszerű extrapolálásán alapultak. Hivatalos definíciók hiányában a gyártók különböző megoldásokat dolgoztak ki. A 3D-s paramétereket esetenként úgy számolták, hogy a felület hosszirányú párhuzamos profiljaira vagy sugárirányú profilokra értékelt 2D-s paraméterek egyszerű átlagát vették. A 3D-s paraméterek elnevezési szabályait is a 2D-s paraméterekből származtatták (sRa, sWa...), az általam használt Surf3D kiértékelő szoftver jelölései is ezt a logikát követik. Mindazonáltal jól bevált megoldások terjedtek el, különösen Stout és munkatársai publikációinak köszönhetően, valamint a Talymap Macintosh szoftver 1993-as forgalomba hozatalával, melyet a Digital Surf fejlesztett ki a Taylor Hobson Form Talysurf műszere számára [Bl06].

Czifra dolgozatában [Cz07] áttekintést adott a 3D-s kiértékelés-technika legutóbbi évtizedes fejlődéséről. Megállapítása szerint: „A 3D-s kiértékelés-technika mindenekelőtt a felületek irányultságának meghatározásában lépett előre. A felület irányultságáról 2D-ben nem kaptunk információt, ugyanakkor műszaki alkalmazások terén igen fontos lehet, elsősorban a kenőanyag elosztás szempontjából [LuIo03]. Bakolas és Brand [Ba03] a felület anizotrópiáját jellemző S_{a1} tényezőt olyan alapvetően fontosnak tartották, hogy numerikusan létrehozott mikrotopográfiák egyik fő bemeneti paramétereként alkalmazták. Thomas és társai [ThRoAm99] fraktál alapú kiértékelést használva jellemeztek 3D-s mikrotopográfiákat, de náluk is kiemelt fontosságot töltött be a felület irányultsága. Hasonló fontosságot tulajdonítottak Zahouani és társai [ZaAsVa01] is az orientációnak, bár ők motívum alapú technikával vizsgálták a felületet. Yanagi, Hara és Endoh [YaHaEn01] újfajta szemlélettel vizsgálta a felületeket. Érdeességcsúcs alapú vizsgálataik elsődleges eredménye a felületek orientációjának meghatározása volt.”

A 2007-ben közzétett ISO/DIS 25178–2 szabványtervezet átfogó előírásokat tartalmaz a felületi mikrotopográfia 3D-s jellemzésére vonatkozóan, és várható, hogy 1–2 éven belül a szabvány is kiadásra kerül. A tervezet szűrésre vonatkozó fogalomrendszerét a 3.3.4 pontban ismertettem, a következőkben a mikrotopográfiát jellemző új 3D-s paramétereket foglalom össze. Az új 3D-s paraméterek jele S (Surface) vagy V (Volume) betűvel kezdődik. A 2D-s elnevezési szabályokkal ellentétben – melyek különbséget tesznek szűretlen profil, érdesség és hullámosság között – 3D-s paraméterek jelölése nem tükrözi a felület jellegét. 2D-ben előfordulhat P_a , R_a , illetve W_a ; 3D-ben csak S_a létezik. A S_a tehát 3D-s érdességi, hullámossági vagy a nyers felületet jellemző paraméter, attól függően, milyen szűrést alkalmaztak a paraméter számítását megelőzően.

3.5.2.1 A mikrotopográfia 3D-s paraméterei

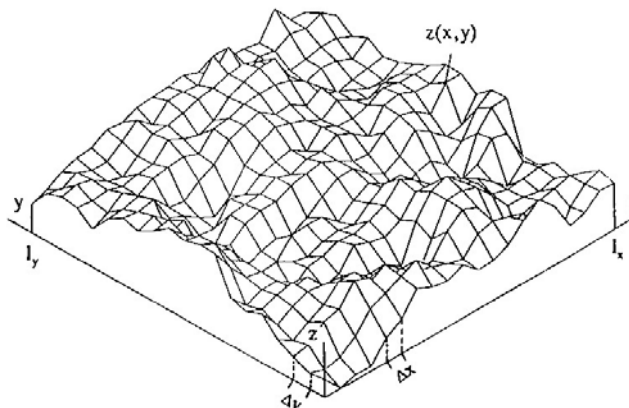
A mikrotopográfia 3D-s paraméterei az alábbiak szerint csoportosíthatók:

- magassági paraméterek (height parameters),
- térközi paraméterek (spatial parameters),
- hibrid paraméterek (hybrid parameters),
- funkcionális paraméterek (functions and related parameters).

Az alábbiakban összefoglalást adok az egyes kategóriákba tartozó paramétereiről, azok részletes definícióját az 1. melléklet tartalmazza.

Amplitudó paraméterek

Az amplitudó (vagy magasság irányú) paraméterek (3.12. táblázat) a vizsgált, 3.40. ábrán értelmezett S-F vagy S-L felületet jellemző $Z=Z(x,y)$ ponthalmaz adataiból számíthatók (3.49. ábra).



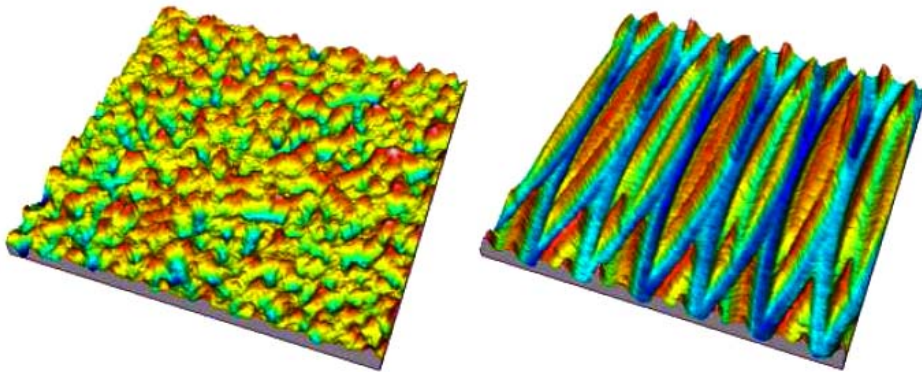
3.49. ábra. A mikrotopográfia diszkrét pontjai [StB100]

Jel	Paraméter neve	Description
Sq	eltérések mértani átlaga	root mean square height of the scale limited surface
Ssk	ferdeségi mérőszám	skewness of the scale limited surface
Sku	lapultsági mérőszám	kurtosis of the scale limited surface
Sp	maximális csúcsmagasság	maximum peak height
Sv	maximális völgymélység	maximum pit height
Sz	maximális magasság	maximum height of scale limited surface
Sa	átlagos egyenetlenség	arithmetical mean height

3.12. táblázat. Amplitudó irányú paraméterek

Térközi paraméterek

A felületi egyenetlenségek irányultsága a működési tulajdonságokat nagyban befolyásolja. Egy felületet izotrópnek nevezünk, ha a mérési iránytól függetlenül azonos tulajdonságokat mutat. Ilyen például egy véletlenszerű felület, mely semmilyen határozott textúrával nem rendelkezik. A műszaki felületek között nagyon ritka az ilyen, legtöbbjük vagy orientált (esztergált, köszörült, csiszolt) vagy periodikus jellegű (elektron sugaras felületi textúra kialakítás, szemcsésített műanyag). Izotróp és anizotróp felületi textúra képét tartalmazza a 3.50. ábra.



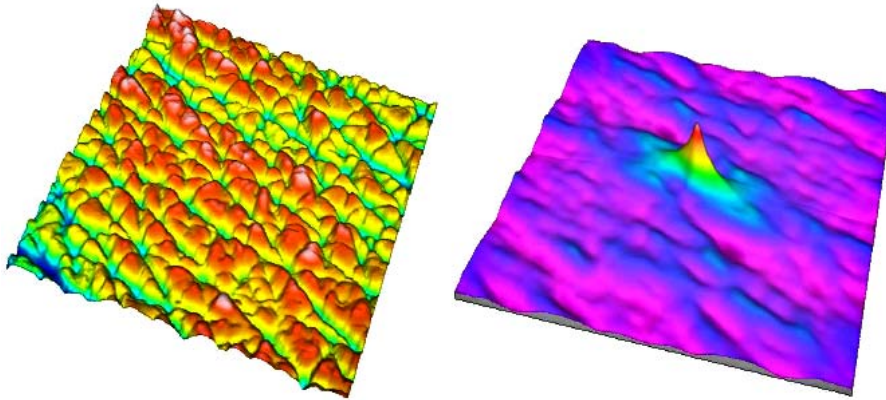
3.50. ábra. Izotróp (bal) és anizotróp textúra (jobb) [BI06]

A felület izotróp vagy anizotróp jellegéről a magasság irányú paraméterek semmiféle információt nem adnak. Az izotrópia azonosítása és számszerű jellemzése Fourier transzformáción, vagy autokorreláción alapuló matematikai eszközökkel történik. Az autokorrelációs függvény (ACF¹⁴):

$$ACF(\tau_x, \tau_y) = \frac{\iint Z(x, y)Z(x - \tau_x, y - \tau_y)dx dy}{\iint_A Z^2(x, y)dx dy} \quad (3.5)$$

Ezzel a függvénnyel olyan kép nyerhető (3.51. ábra), amelyből a textúrát jellemző mérőszámok definiálhatók.

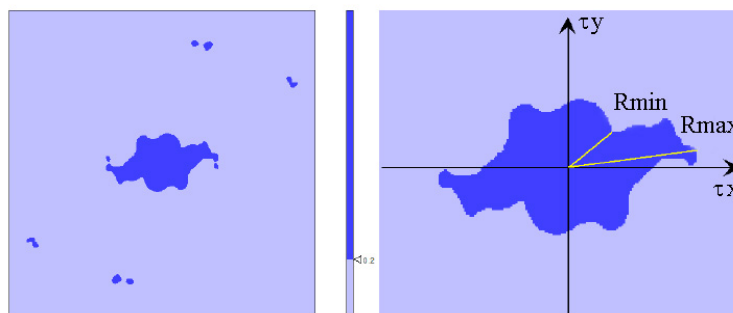
¹⁴ Autocorrelation Function



3.51. ábra. Anizotróp felület és autókorrrelációs függvénye [BI06]

Az autókorrrelációs kép minden esetben tartalmaz egy kiemelkedő központi csúcsot, melynek az amplitúdója 1. Egyes esetekben található egy második csúcs is, amely bizonyos korrrelációra utal a felület egy része és a teljes topográfia között. Ez az az eset, amikor a felület periódikus, vagy pszeudoperiodikus „motifokat” (felületelemeket) tartalmaz.

A térbeli autókorrrelációs függvény központi csúcsa a felület izotrópiájának indikátora (ez jellemzi az izotrópiát). A központi csúcs jellemzésére első lépésként 0,2 szinten „metszést” (thresholding) végzünk, majd a központi csúcs metszékét jellemezzük. A metszék képét és a központi csúcs metszékén értelmezett értékeket a 3.52. ábra mutatja be.



3.52. ábra. Az ACF metszéke és a központi metszék a sugarakkal [BI06]

A határoló (thresholding) szint alapértelmezésben 0,2, de bizonyos felületek esetén lehet ennél alacsonyabb, vagy magasabb [BI06].

A központi metszéken értelmezhető a legnagyobb (R_{max}) és legkisebb (R_{min}) sugár. Ha a felület minden irányban hasonló tulajdonságokkal bír, akkor a metszék közelítőleg kör alakú, így a legkisebb és legnagyobb sugár közel egyenlő. Ha a felület határozott orientációval rendelkezik, akkor központi metszék elnyújtott, és a maximális sugár lényegesen nagyobb, mint a minimális. Ennek alapján mód van a felületek izotrópiáját jellemző paraméterek definiálására, melyeket a 3.13. táblázat foglal össze.

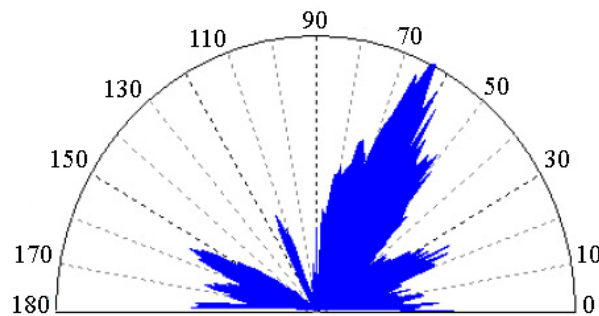
Jel	Paraméter neve	Description
Str	textúrahelyzet viszonyszám	texture aspect ratio of the scale limited surface
Sal	autókorrrelációs hossz	auto-correlation length
Std	felület textúra iránya	texture direction of the scale limited surface

3.13. táblázat. Térközi paraméterek

Az Str textúrahelyzet viszonyszám a két sugár hányadosa ($Str=R_{min}/R_{max}$), 0 és 1 közötti mértékegység nélküli szám. Izotróp felület esetén az érték 1-hez közeli, míg jelentős anizotrópánál 0-hoz közeli értéket kapunk.

Az R_{min} érték ugyancsak hasznos jelzőszáma a felületnek. Nagy hullámhosszú összetevőkből álló felület nagy R_{min} értéket ad, és fordítva. A jellemző autókorrelációs hossz: $Sal=R_{min}$. Az ISO/DIS 25178 szerint a paramétert neve „auto-correlation length” (autókorrelációs hossz), de a szakirodalom elterjedten használja a „fastest decay autocorrelation length” (leggyorsabb csillapodású autókorrelációs hossz) terminológiát. Az Sal paraméter mértékegysége μm .

A Fourier spektrum polár koordinátás értelmezése lehetőséget ad a mikrotopográfia jellegzetes irányainak definiálására. A „polár-spektrum” (3.53. ábra) a felület amplitúdó sűrűség spektrumát (PSD^{15}) minden irányban figyelembe veszi. A legnagyobb PSD értékhez tartozó szög jellemzi a felület textúráirányát.



3.53. ábra. A felület polár-spektruma [B106]

Hibrid paraméterek

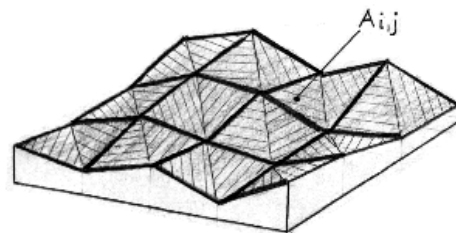
A hibrid (vagy összetett geometriai) paraméterek (3.14. táblázat) a felület magasságirányú és térközi információinak kombinációi.

Jel	Paraméter neve	Description
Sdq	közepes hajlás (dőlés)	root mean square gradient of the scale limited surface
Sdr	felületarány	developed interfacial area ratio of the scale limited surface

3.14. táblázat. Hibrid paraméterek

Az Sdq közepes hajlás (dőlés) a felület mikrotopográfiája hajlásának (dőlésének) négyzetes középértékét adja meg a mintavételi felületen belül.

Az Sdr felületarány kiszámításához a mintavételi pontokra háromszöglapocskákból alkotott felületet fektetünk (3.54. ábra), majd az így kapott felület ($\sum A_{i,j}$) és a mintavételi felület különbségét vonatkoztatjuk a mintavételi felületre.

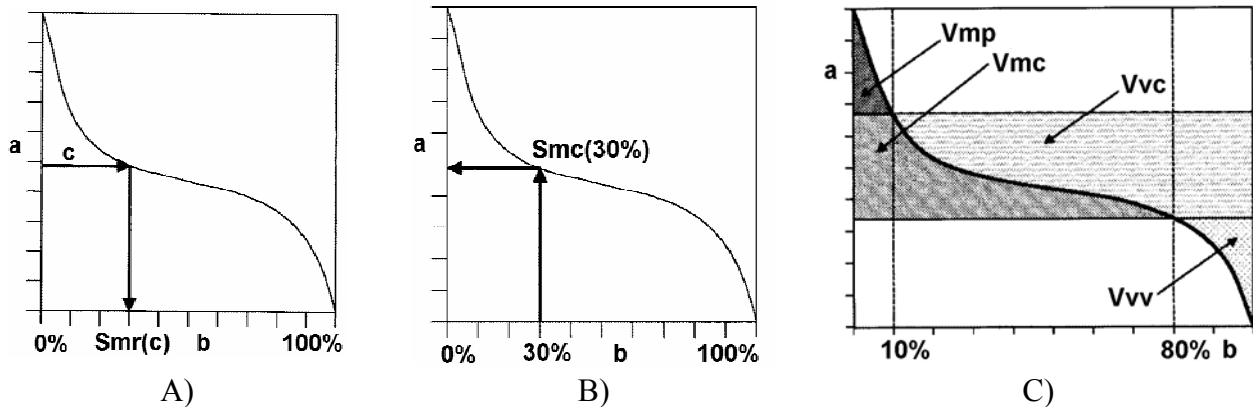


3.54. ábra. A felület elemi háromszöglapocskákkal való lefedése Sdr kiszámításához

¹⁵ Power Spectral Density

Funkcionális paraméterek

Az egymással kapcsolatban lévő, működő felületek topográfiai jellege alapvetően meghatározza azok működési jellemzőit. A funkcionális (vagy működési tulajdonságokat leíró) paraméterek a felületeket működési szempontból (hordozótulajdonságok, bejáródási viselkedés, kenőanyag-megtartási képesség) jellemzik. A 3.15. táblázatban összefoglalt funkcionális paramétereket a hordfelület görbéből származtatjuk a 3.55. ábra szerint.



3.55. ábra. A funkcionális paraméterek származtatása (ISO/DIS 25178)

A 3.55. ábra vízszintes tengelyein a hordfelület arány (b), függőleges tengelyein pedig a profilmélység (a) szerepel. A hordfelület görbét 10, illetve 80% hordozófelületnél metsző két vízszintes egyenes (C ábra) a hordozófelületi görbét három zónára osztja: a topográfia 10% hordfelület arány feletti része a csúcszóna, a 10% és 80% közti rész a magzóna, a 80% alatti rész pedig a völgyzóna. A hordfelület görbe e három zónát további 2–2 részre osztja: az anyagterfogat, illetve az ürestérfogat zónára. Ezen a zónák számszerűsítésével a felület hordozótulajdonsága és folyadékmeztartó képessége jellemezhető.

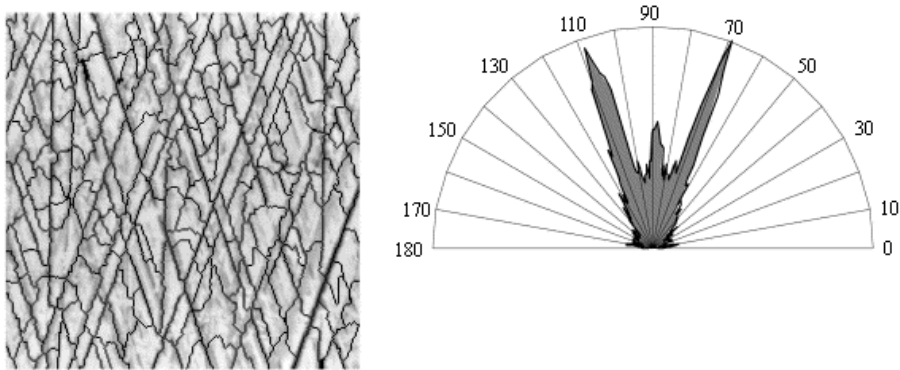
Jel	Paraméter neve	Description
Smr(c)	hordfelület arány	areal material ratio of the scale limited surface
Sdc (mr)	inverz hordfelület arány	inverse areal material ratio of the scale limited surface
Vv(mr)	ürestérfogat hányad	void volume
Vvv	völgyzóna ürestérfogat hányada	dale void volume of the scale limited surface
Vvc	magzóna ürestérfogat hányada	core void volume of the scale limited surface
Vm(mr)	anyaghányad	material volume
Vmp	csúcszóna anyagterfogat hányada	peak material volume of the scale limited surface
Vmc	magzóna anyagterfogat hányada	core material volume of the scale limited surface
Sxp	csúcsmagasság	peak extreme height

3.15. táblázat. Funkcionális paraméterek

A fenti paramétereken túl a működési tulajdonságok jellemzésére használhatók még az $S_k, S_{pk}, S_{vk}, S_{mr1}, S_{mr2}, S_{vq}, S_{pq}, S_{mq}$ paraméterek, amelyek az ISO 13565 szabvány szerinti R_k, S_{pk}, S_{pb} profilparaméterek 3D-s értelmezései.

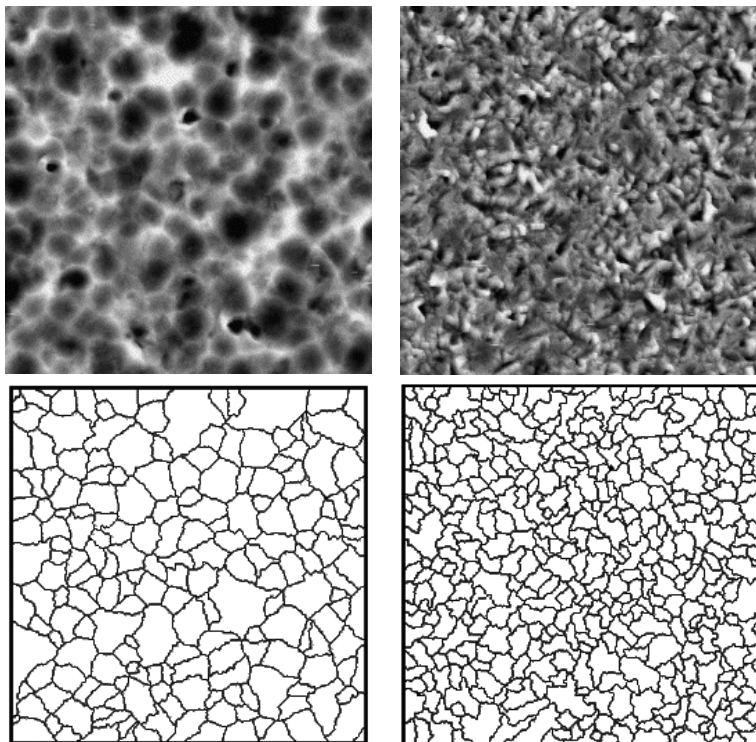
3.5.2.2 A 3-dimenziós motif eljárás

A 3.3.2.2. pontban bemutatott 2 dimenziós, vonal menti analízisre kifejlesztett motif módszer 3D-re történő kiterjesztésének lehetőségét több kutató is vizsgálta. A térbeli motifok definiálásával, a kombinációk módszerével kapcsolatos első jelentős munkát Scott publikálta [Sc98]. A motif módszer mikrotopográfiai alkalmazására újszerű javaslatot tett Barré és Lopez [BaLo00]. Ők a térbeli motifot a felület vízválasztó vonalaival (watershed lines) határolt „vízgyűjtő medence”-ként definiálták, javaslatot dolgoztak ki a térbeli motifok kombinációjára. Zahouani és társai [ZaAsVa01] elsőként alkalmazták a felület orientációjának (irányultságának) vizuális jellemzésére a morfológiai rózsát, mely a motifokra bontott felület irányszög eloszlásának kördiagramja. Anizotróp felület morfológiai rózsájára a 3.56. ábra mutat példát.



3.56. ábra. Anizotróp felület és morfológiai rózsája [BaLo01]

Barré és Lopez egy következő munkájukban [BaLo01] rámutattak arra, hogy bizonyos esetekben, amikor a hagyományos 3D-s paraméterek segítségével a mikrotopográfia nem jellemezhető, a 3-dimenziós motif eljárás alkalmazása célravezető.



3.57. ábra. Homokfúvott felületek mikroszkópikus képei és motifjaik

A 3.57. ábrán bemutatott két homokfűvott felület S_a és S_q paramétere között csupán néhány százaléknyi eltérés van. A két felület közti, szemmel is látható jelentős különbséget a motíf kiértékelés viszont tükrözi, az azonos feltételek mellett létrehozott térbeli motíffok száma a baloldali felületnél 199, a jobboldalinál pedig 392.

Mezghani és Zahouani [MeZa04] úgy vélik, hogy a felület háromdimenziós motíffjai a felületi topográfia kulcselemei, és algoritmust dolgoztak ki az érdekesség és hullámosság 3D-s motíf alapú jellemzésére.

Ezek a kutatások készítették elő az ISO szabványtervezetet, amelyben megjelenő 3 dimenziós motíf-módszer alapvetően a digitális képelemzésben a véletlen homogén textúrák elemzésekor használatos „szegmentálási eljárás” alkalmazásán alapul. A módszer elve, főbb sajátosságai a következők:

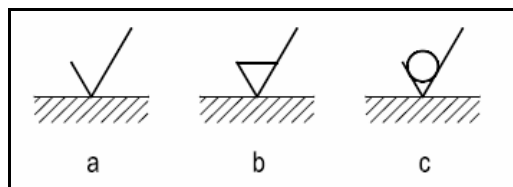
- Első lépésben a vizsgálandó felületi topográfiáról egy többtónusú digitális képet állítanak elő (mechanikus, lézeres stb., letapogatás eredményként), az így kapott digitális képen a szűrkeségi szinteknek a topográfiát számszerűen jellemző diszkrét érdekességmélység-értékek (nem-negatív egész számok) felelnek meg.
- A második lépésben a többtónusú digitális képet alkalmas szegmentálási eljárással (többnyire a watershed algoritmus alkalmazásával) „homogén tartományokra” (ún. komponensekre) bontják. Ez utóbbiakat, szokásos terminológiával hegynek (hill) és völgynek (dale) nevezik.
- Végül a komponensek (motíffok) geometriai sajátosságait (pl. területnagyság, átmérő, szélesség) külön-külön is analizálják, és kiterjedésük nagyságának, egymáshoz viszonyított helyzetük számszerű minősítésére különféle statisztikus jellegű, digitális geometriai mennyiségeket definiálnak.

Ilyen szokásos számszerű jellemző például a csúcstűrség (density of peaks= Sp_d), átlagos csúcsgörbület (arithmetic mean peak curvature= Spc), a hegy és völgy típusú tartományok egymáshoz viszonyított területnagyságának aránya.

A 3D-s motíf eljárás, illetve az általa származtatott statisztikus geometriai mennyiségek előnye, hogy az utóbbiakkal olyan felületi struktúrák is hatékonyan minősíthetők, amelyek megkülönböztetésére a hagyományos módszerek alkalmatlannak bizonyultak.

3.5.3 A hullámosság előírása műszaki dokumentációban

A felületi textúra műszaki dokumentációkon való megadásának módját a 2002 óta hatályos EN ISO 1302 szabvány írja elő. Mivel a mikrotopográfiai jellemzők szabványosítására még nem került sor, az előírások értelemszerűen csak a 2D-ben értelmezett felületjellemzőkre vonatkoznak. A felületi textúra előírása annak rajzjelével, jellemző határértékének vagy határértékeinek előírásával és a mérési, értelmezési feltételekre vonatkozó kiegészítő adatok megadásával történik. A használható rajzjeleket a 3.58. ábra mutatja be.



3.58. ábra. A felületminőség rajzjelei

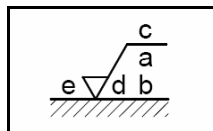
A rajzjelek önmagukban csak vizsgálandó felületre utalnak, a felületminőség mikrojeometriai összetevőjére vonatkozó követelményeket nem tartalmazzák. A b) jel akkor használandó, ha a felület megmunkálása anyagleválasztással (például forgácsolással) történik, a c) jel pedig arra utal, hogy az

anyagleválasztás nem megengedett. Amennyiben a technológiára való megkötés nincs, a 3.58. a) ábra szerinti nyitott éket kell használni. Ha a felületminőség előírása nem rajzon, hanem egyéb műszaki dokumentációban történik, akkor a rajzjeleket betűkkel lehet helyettesíteni a 3.16. táblázat szerint.

Rajzjel	Rajzjel jelentése	Szöveges megadás
	Any process allowed Bármilyen megmunkálás	APA
	Material removal required Anyagleválasztás	MRR
	No material removed Anyagleválasztás nélküli alakítás	NMR

3.16. táblázat. A rajzjelek szöveges helyettesítése

Az érdekesség és hullámosság részletesebb megadásához a rajzjel hosszabbik ágát egy vonallal kell kiegészíteni, és a kiegészített rajzjelen a 3.59. ábra szerint kell az egyes előírás elemeket elhelyezni.



3.59. ábra. A felületminőség elemeinek elhelyezése

Az „a” helyen kerül megadásra a hullámosság vagy más mikogeometriai paraméter jele és határértéke (pl. Wt 1,6), valamint a mérési feltételek (pl. szűrő típusa, cut-offok, értékelési hossz, stb.). Ha második vagy további paraméter előírása is szükséges, akkor az a „b” helyen, illetve alatta helyezendő el. A „c” helyen adható meg a gyártási eljárás módja, a kezelések (pl. hőkezelés), bevonatok vagy más gyártási követelmények. A „d” helyen lehet megadni a megmunkálással kialakított felületi mintázatot (például szerszámnyomokat), megadva az elhelyezkedés irányát. A felületi mintázatok jelére és magyarázatára a 3.17. táblázat mutat néhány példát. Az „e” helyen a megmunkálási ráhagyás értékét lehet mm-ben megadni.

Rajzjel	Értelmezési példa
=	A barázdairány annak a nézetnek a vetítési síkjával párhuzamos amelyben a jel van. Elhelyezési irány
L	A barázdairány annak a nézetnek a vetítési síkjára vonatkoztatva merőleges amelyben a jel van. Elhelyezési irány
X	A mintázat annak a nézetnek a vetítési síkjára ferde irányban keresztezve, amelyben a jel van Elhelyezési irány
M	Többirányú mintázat

3.17. táblázat. Példák a megmunkálási nyomok irányának rajzjeleire

A 3.2.4 fejezetben már foglalkoztam azzal a hullámosság-kiértékeléstechnikai problémával, hogy a hatályos ISO szabványok nem tartalmazzak előírást az ln értékelési hosszra (evaluation length) és az lw hullámossági értékelési szakaszra (sampling length) vonatkozóan. Az lw értékelési szakaszt az alakszűrő λf határhullámhosszával azonos értékűre kell választani, de sem a λf értéke sem az $n=\lambda f/\lambda_c$ viszonyszám nincs előírva. Az n értékét a tervező választhatja meg, a 3.2.4. pontban leírtak alapján javasolt érték n=10. Az érdességmérésnél az értékelési hossz (ln) általában öt értékelési szakaszból (lr) áll. A hullámosság esetében a szabvány nem tartalmaz megkötést, a dokumentációt készítő tervezőnek kell előírnia, ha az értékelési hossz egynél több értékelési szakaszból (alapszakaszból) áll. Az ezt kifejező érték: $m=ln/lw$, melyre vonatkozó korábbiakban megfogalmazott javaslatom: $m=1$ vagy 2.

A hullámosság paraméteres jellemzésének egyértelmősége érdekében tehát valamennyi méréstechnikai jellemzőt elő kell írni. Az előírás módját a 3.18. táblázat foglalja össze.

	szűrő	cut-off (mm)	/	paraméter	ln/lw	limit szabály	érték (μm)
U (felső) vagy L (alsó)	Gauss vagy "2RC"	$\lambda_c - n\lambda_c$	/	W....	m	16% vagy max.

3.18. táblázat. Középvonalas hullámossági paraméterek előírása

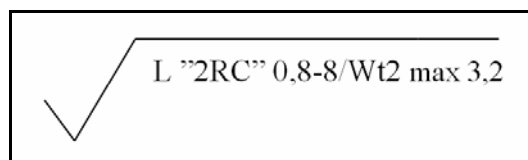
A 3.18. táblázatban pirossal kiemelt előírások az alapesetet jelentik, ezek megadására nincs szükség. Tehát előírás hiányában:

- a paraméter megadott értékét, mint felső (U=Upper) megengedett határértéket kell tekinteni (pl. $W_{a1,6}$ jelentése $W_a \leq 1,6 \mu m$),
- a szűrést szabványos Gauss szűrővel kell végezni,
- az értékek túrésára az ún. 16%-os szabály (ISO 4288) érvényes.

Például az MRR 0,8–8/ $W_{a1,6}$ szöveges előírás jelentése:

- a megmunkálás anyageltávolítással történik,
- Gauss szűrés,
- $\lambda_c=0,8mm$, $\lambda f=8mm$, ($lw=\lambda f=8mm$, $n=\lambda f/\lambda_c=10$)
- $ln=1 \times \lambda f=8mm$,
- $W_a \leq 1,6 \mu m$,
- a 16%-os szabály érvényes.

Az alapesettől eltérő (a 3.18. táblázatban kézzel kiemelt) előírásokat a dokumentációban fel kell tüntetni például a 3.60. ábra szerint.



3.60. ábra. Alapesettől eltérő hullámosság rajzi előírása

A 3.60. ábrán bemutatott rajzi előírás értelmezése:

- technológiai megkötés nincs
- 2RC szűrés,
- $\lambda_c=0,8mm$, $\lambda f=8mm$ ($lw=\lambda f=8mm$, $n=\lambda f/\lambda_c=10$),
- $ln=2 \times \lambda f=16mm$,
- alsó (L=Lower) érték, azaz $W_t \geq 3,2 \mu m$,
- az értékek túrésára az ún. max. szabály (ISO 4288) érvényes.

Az érdességi (R) paraméterek előírásánál az EN ISO 1302 nem teszi kötelezővé az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló szűrő λ_c határhullámhosszának megadását, amennyiben annak meghatározására az előzetesen megbecsült érdességi paraméterek alapján az EN ISO 4288 szabvány szerint került sor. A 3.4. fejezetben rámutattam arra, hogy ez a gyakorlat komoly hibaforrást jelent, ezért minden esetben célszerűnek tartom a határhullámhosszak előírását.

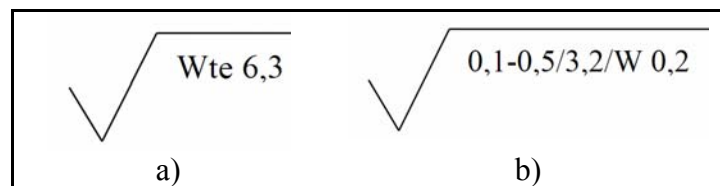
A motíf hullámossági paraméterek előírásának szabályait a 3.19. táblázat foglalja össze. A motífk A és B szélességi határait valamint az l_n értékelési hosszt (3.11. táblázat) az $A=0,5$ mm, $B=2,5$ mm, és $l_n=16$ mm alapesetek kivételével elő kell írni.

A (mm)	–	B (mm)	/	l_n (mm)	/	paraméter	érték (μm)
0,5	–	2,5	/	16	/	W....
vagy	–	vagy	/	vagy	/		
A	–	B	/	l_n	/		

3.19. táblázat. Motíf hullámossági paraméterek előírása

A motíf kiértékelés során csak egy értékelési szakasz van, és minden esetben a 16%-os szabály érvényes. A 3.61 ábrán bemutatott előírások értelmezése az alábbi:

- $A=0,5$ mm, $B=2,5$ mm, $l_n=16$ mm, $W_{te} \leq 6,3 \mu\text{m}$
- $A=0,1$ mm, $B=0,5$ mm, $l_n=3,2$ mm, $W \leq 0,2 \mu\text{m}$



3.61. ábra. Motíf hullámossági paraméterek rajzi előírása

A mikrotopográfiai 3D-s jellemzők előírásának szabványosítására még nem került sor, ennek kimunkálása során véleményem szerint az alábbi szempontok figyelembe vétele szükséges:

- A szűrés alapvetően meghatározza a mikrotopográfia jellegét (3.15. és 3.41. ábrák), ezért ennek egyértelmű specifikálása elengedhetetlen. A 3D-s hullámosság (S-F felület) jellemzésekor meg kell adni a kistérközű egyenletlenség (érdesség) leválasztására szolgáló S szűrő típusát és nesting indexét (pl. a Gauss-szűrő cut-off értékét) és az alakhiba leválasztására szolgáló F operátor típusát és nesting indexét.
- A profil paraméterek előzőekben igazolt értékelés hossz érzékenységből következik, hogy a hullámosság 3D-s paraméterei is erősen függenek a kiértékelt terület nagyságától. Ezt az megállapítást alátámasztották szerzőtársaimmal végzett kísérleteink is [FaCzPaHo05], melyek során eltérő megmunkálási eljárással előállított, eltérő topográfiai jelleggel bíró felületek esetében vizsgáltuk az értékelési terület nagyságának mikrotopográfiai paraméterekre kifejtett hatását. Elengedhetetlen fontosságú tehát a kiértékelt terület x-y irányú méreteinek és a mérési irányoknak az előírása.

3.6 Összegzés

A 3. fejezetben a nemzetközi szakirodalom feldolgozása alapján a felületi hullámosság kiértékeléstechnikájának átfogó bemutatását végeztem el, és a kiértékeléstechnikára vonatkozó új javaslatokat dolgoztam ki.

Ismertettem a felület hullámosságának különböző értelmezéseit, a hullámosság-mérés szabványosításának fejlődését, a szabványosítás jelenlegi helyzetét és a várható tendenciákat.

A mérési lehetőségek általános ismertetése mellett igazoltam, hogy az általam használt metszettepintós műszer a hullámosság kiértékeléshez megfelelő eszköz. Mérésekkel alátámasztott javaslatokat dolgoztam ki azokra a mérési paraméterekre (mintavételi távolság, kiértékelési hossz, kiértékelési szakasz, kiértékelési terület), amelyeket szabványelőírások nem tartalmaznak, és amelyek hiánya az egyértelmű kiértékelést sok esetben lehetetlenné teszi.

Rendszereztem az alakhiba, a hullámosság és az érdesség szétválasztására szolgáló eljárásokat, bemutattam a legkorszerűbb szűrési módszereket (pl. morfológiai-, wavelet, 3D-s szűrés), elvégeztem ezek összehasonlító elemzését. Mérésekkel igazoltam, hogy az érdesség és hullámosság szétválasztásának szabványokon nyugvó gyakorlata komoly hibalehetőséget rejt magában, és javaslatot tettem ennek megoldására.

Összefoglaltam felületi hullámosság szabványos, valamint speciális 2D-s paramétereit, ismertettem a 3D-s felületvizsgálat legújabb alapelveit, kiértékelési módszereit, elvégeztem a 3D-s topográfiai paraméterkészlet osztályozását. A hullámosság jellemzésére szolgáló 2D-s és 3D-s paraméterek részletes ismertetését a 2. Melléklet tartalmazza. Rendszereztem és értelmeztem a 2D-s hullámosság műszaki dokumentációkban való előírásának szabályait, javaslatokat tettem a 3D-s előírás szempontjaira.

A fejezet javaslatai hozzájárulhatnak a hullámosság-kiértékeléstechnika ellentmondásainak, illetve hiányosságainak megszüntetéséhez, a szakirodalmi összefoglalások és rendszerezések pedig a polgári és katonai műszaki képzés forrásanyagaként hasznosíthatók.

4 A HULLÁMOSSÁG ÉS A MŰKÖDÉS KAPCSOLATA

A felületi hullámosság működésre gyakorolt hatását az alábbi módszerekkel vizsgáltam:

- Numerikus modellekkel elemeztem, hogy a felület hullámossága milyen módon és mértékben befolyásolja a működési tulajdonságokat leíró mikrotopográfiai jellemzőket.
- Koptatókísérletekkel vizsgáltam a hullámosság és a súrlódási tényező, valamint a bejáródási folyamat összefüggését. A hullámosság és a súrlódási tényező kapcsolatát a Persson-féle analitikus modell felhasználásával is igazoltam.

4.1 A hullámosság hatása a működési tulajdonságokat leíró jellemzőkre

A hullámosság működési tulajdonságokat leíró paraméterekre gyakorolt hatásának feltárásához különböző hullámossággal rendelkező felületek vizsgálata szükséges. A gyakorlatban azonban, mivel a hullámosságot rendszerint véletlenszerűen fellépő technológiai rendellenességek okozzák, előzetesen meghatározott hullámossággal bíró felületek előállítása nehezen irányítható, legyártásuk csak hosszadalmas és költséges eljárás keretében lenne lehetséges. Célszerű tehát olyan módszert alkalmazni, amellyel lehetőség van a hullámosság komponens ellenőrzött módon való létrehozására, illetve változtatására. A legkézenfekvőbb megoldás a hullámossági felület, illetve pontjainak előállítására a számítógépes modellezés. A szerzőtársammal kidolgozott módszer publikálására a közelmúltban került sor [HoGy08]. A generált hullámossági felületekre valós felület mért érdességi topográfiáját matematikai úton szuperponálva vált lehetségessé a hullámosság hatásának elemzése.

4.1.1 Felületek generálása

Az előállított pontok és a ráillesztett felület megjelenítésére több szempontból is a Rhinoceros NURBS modellező szoftver bizonyult a legmegfelelőbbnek. Alkalmos a mérési adatok közvetlen fogadására, geometriai elemek megjelenítésére, programozható analízisére, manipulálására. A hullámossági felület pontjainak előállításához programozási eszközként Visual Basic-ot használtam. Az előállított pontokra illeszkedő felület létrehozása egy már bevált módszer alkalmazásával oldható meg [Gy07].

A felületek hullámossága általában szinuszos jelleget mutat, mivel a leggyakoribb keletkezési okot a rezgések, lengések jelentik. Ez a tény nagyban megkönnyíti a modellezést, mivel így a felület alakja a hullámosság amplitúdó és hullámhossz paraméterein keresztül megadható. Az i -ik sor j -ik pontjának magassági koordinátája:

$$z_{i,j} = A \cdot \sin\left(\frac{s \cdot j}{180} \cdot \pi\right) \cdot \frac{360}{\lambda}, \quad (4.1)$$

ahol λ [μm] hullámhossz,

A [μm] amplitúdó,

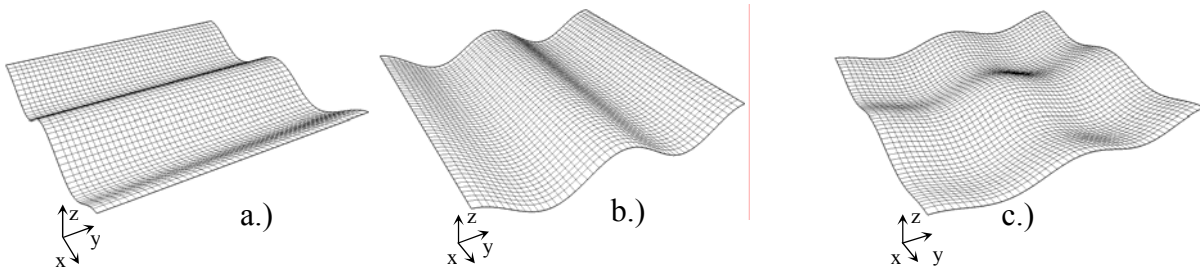
s [μm] a felületre illesztendő érdesség pontok lépésköze.

Az összefüggés, amely alkalmas az érdességi pontokhoz illesztendő felület összes pontjának meghatározására a 4.1. a) ábrán bemutatott H alapfelület pontjait adja meg. A különböző további felületek megalkotásához az alapfelület pontjait használjuk fel. Legyen a $H(i, j)$ az alapfelület pontjait tartalmazó tömb. A 4.1 b) ábrán látható felület pontjai így, ha a pontok száma és a lépésköz értéke a sorokban és oszlopokban megegyezik:

$$V(i, j) = H(i, j)^T \quad (4.2)$$

összefüggés szerint adódnak. A 4.1 c) ábra szerinti összetett felületforma hozható létre a fenti tömbök összeadásával:

$$R(i, j) = H(i, j) + V(i, j) \quad (4.3)$$



4.1. ábra. Hullámosság felületek

Az amplitúdó a 4.1. ábra példáiban $A = \text{constans}$ értékű, ez a megoldás alkalmas viszonylag szabályos hullámosság (pl. a 3.47. ábra szerinti) modellezésére. Változó amplitudójú hullámosság modellezhetőségének érdekében a programba bekerült egy modul, ami különböző függvények szerint változó amplitudójú felületek generálását teszi lehetővé. A modul segítségével a konstans alap-amplitúdóra lineáris, hatvány és köbös polinomiális függvények ültethetők.

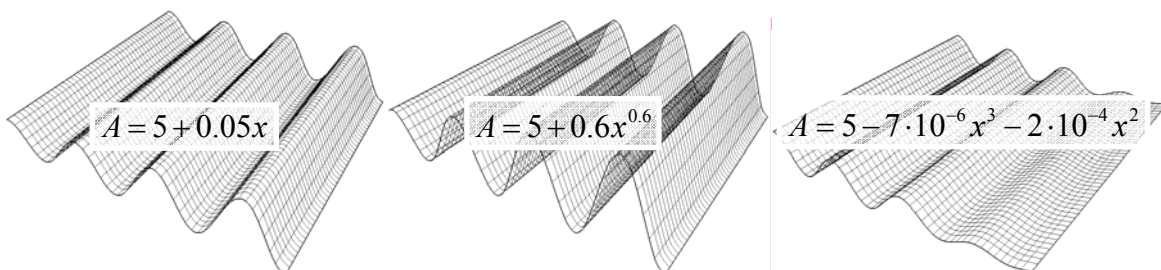
Az A_i változó amplitúdó az A alap amplitúdó és a módosító részfüggvények összege:

$$A_i = A + A_{lin}(x) + A_{hatv}(x) + A_{pol}(x) \quad (4.4)$$

A lineáris, hatvány és köbös polinom alakú módosító amplitúdó-részfüggvények:

$$A_{lin} = a \cdot x + b, \quad A_{hatv} = c \cdot x^d + e, \quad A_{pol} = f \cdot x^3 + g \cdot x^2 + h \cdot x + i \quad (4.5)$$

A függvények amplitúdó módosító hatását az $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ együtthatóik értékével lehet befolyásolni, amire a 4.2. ábra mutat példákat:

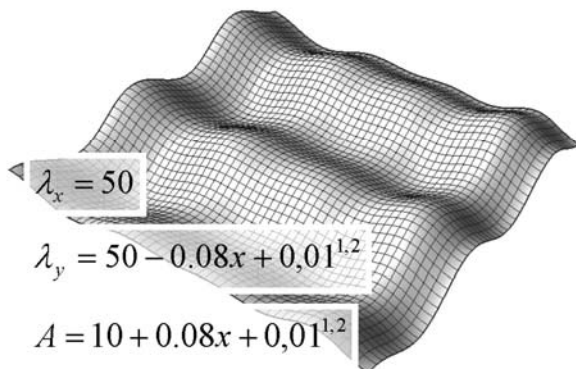
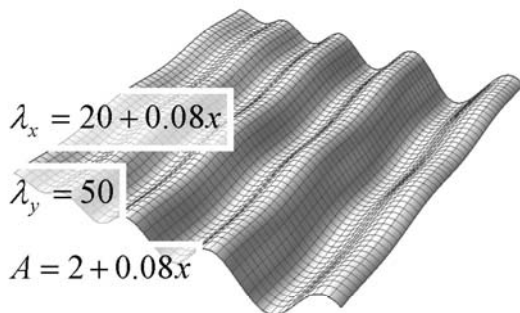
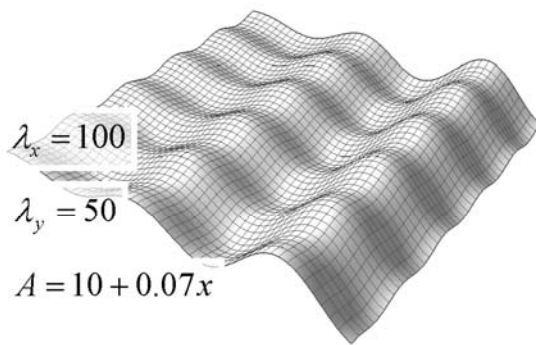


4.2. ábra. Változó amplitúdójú hullámosság felületek

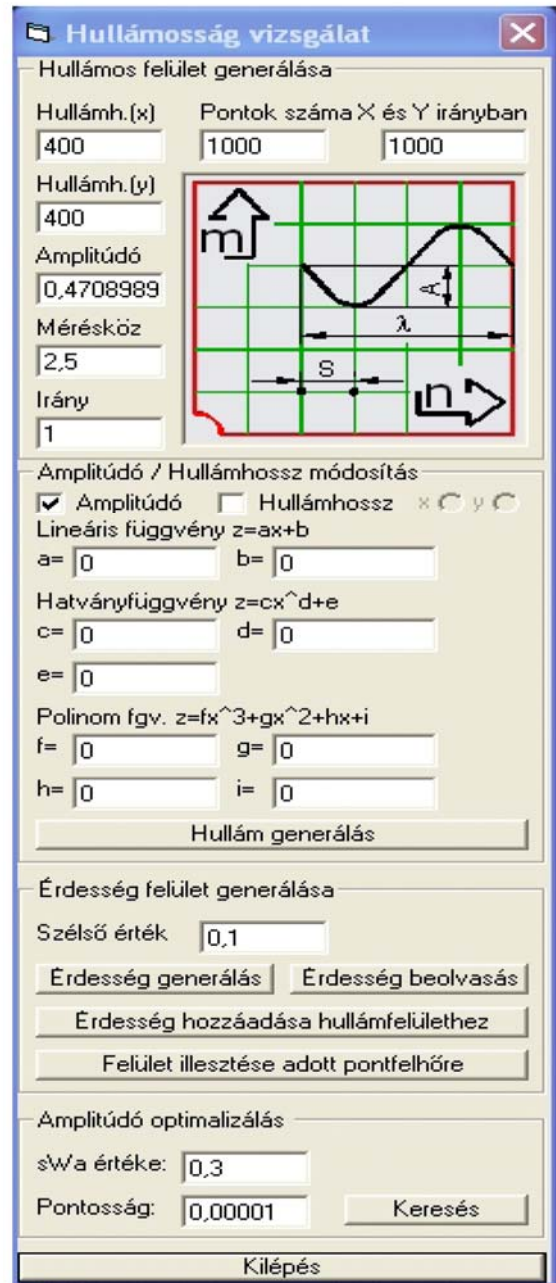
Az így előállított alapfelületből a (4.2) és (4.3) összefüggések alkalmazásával további felületek állíthatók elő. A hullámosság, illetve a hullámosság és az amplitúdó együttes változtatására szintén szükség lehet, amelyekhez szintén a fenti módszert adaptáljuk. Az így létrehozható további felületekre mutat példát a 4.3. ábra.

A megírt számítógépes program lehetővé teszi a különböző hullámossági felületek generálását úgy, hogy a hullámossági topográfia átlagos hullámossága (sWa) előre beállítható értékű legyen.

Az érdeességi topográfia felvételéhez érdeességmérést végeztünk köszörült és szikraforgácsolt érdeességi etalonon, melyen a topográfia kialakítása a hullámosság minimális szinten tartásával történik. A méréshez használt RHT-3-50 típusú csúszkás tapintó konstrukciója önmagában hordozza a felületi hullámosság mérés közben történő szűrését, így a mért topográfia tisztán érdeességi (R) topográfiának tekinthető. A vizsgálandó, különböző hullámossági jellemzőkkel bíró topográfiák a generált hullámosság és a mért érdeesség szuperpozíciójával hozhatók létre.



4.3. ábra. Változó hullámhosszú hullámosság felületek

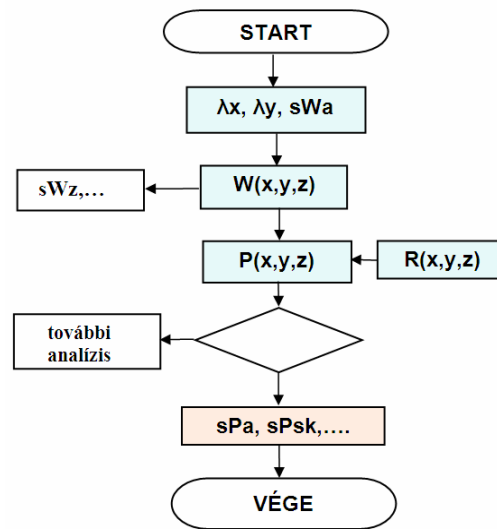


4.4. ábra. A felületgeneráló program kezelőfelülete

A megírt számítógépes program kezelőfelületét a 4.4. ábrán mutatom be. Az ábrán nyomonkövethető, hogy a generálandó felület nagyszámú paraméterének választhatóságán keresztül szinte tetszőleges hullámossági topográfia létrehozása lehetséges.

4.1.2 A felületi hullámosság hatásának vizsgálata

A kiértékelésre kerülő topográfia létrehozásának algoritmusát a 4.5. ábra mutatja:



4.5. ábra. W és P topográfia létrehozásának algoritmus

Első lépésben a 4.1.1. pontban ismertetett program segítségével 14 különböző $W(x,y,z)$ hullámossági felületet generáltam. Konstans amplitúdók mellett az x és y irányú hullámhosszak kombinációit vizsgáltam úgy, hogy a hullámossági topográfia átlagos hullámossága (sWa) előzetesen beállított értékre adódjon. A program input adatainak ($\lambda_x, \lambda_y, sWa$) kombinációit és a számított sWz tízpont magasság értékeket a 4.1. táblázat tartalmazza.

Ssz	Hullámhossz [μm]		Amplitúdó [μm]		Hullámossági paraméterek		$\cong sWa/sRa$	
	λ_x	λ_y	X irány	Y irány	sWa (μm)	sWz (μm)	köszörült $sRa=0,39 \mu\text{m}$	szikraforg. $sRa=0,48 \mu\text{m}$
1.	400	-	✓	-	0,3	0,942	0,8	0,6
2.	-	400	-	✓	0,3	0,942	0,8	0,6
3.	400	400	✓	✓	0,3	1,478	0,8	0,6
4.	800	-	✓	-	0,3	0,927	0,8	0,6
5.	-	800	-	✓	0,3	0,927	0,8	0,6
6.	800	800	✓	✓	0,3	1,461	0,8	0,6
7.	400	800	✓	✓	0,3	1,470	0,8	0,6
8.	800	400	✓	✓	0,3	1,470	0,8	0,6
9.	400	1200	✓	✓	0,3	1,467	0,8	0,6
10.	1200	400	✓	✓	0,3	1,467	0,8	0,6
11.	800	800	✓	✓	0,1	0,487	0,25	0,2
12.	800	800	✓	✓	0,2	0,974	0,5	0,4
13.	800	800	✓	✓	0,4	1,949	1	0,8
14.	800	800	✓	✓	0,5	2,435	1,25	1

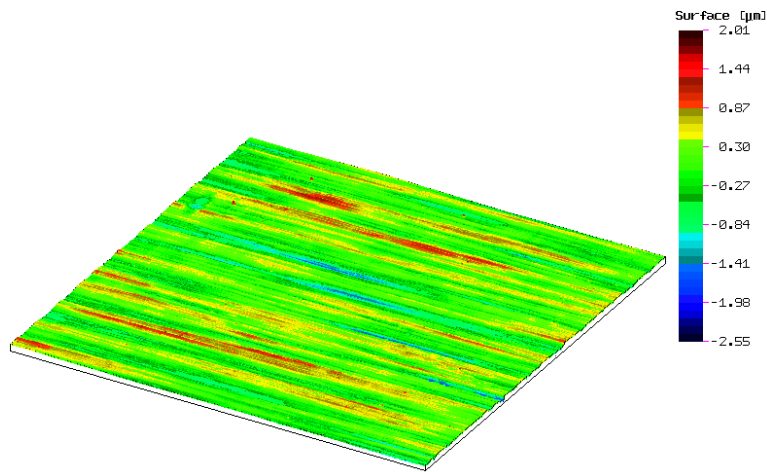
✓ sWa inputadat alapján a program számítja

4.1. táblázat. A generált hullámosságok paraméterei

Ilyen módon lehetővé vált a hullámosság és érdesség arányának beállítása, valamint egy adott átlagos hullámosság mellett a hullámhossz hatásának vizsgálata. A vizsgált esetek többségében az sR_a átlagos érdesség és sW_a átlagos hullámosság aránya 0,6 és 0,8 között volt. Az sW_a/sR_a arányok kerekített értékeit a 4.1. táblázat jobboldali oszlopai tartalmazzák. A λ_x és λ_y hullámhosszak megválasztása (400, 800 és 1200 μm) a gépipari gyakorlatban előforduló tartományban, a vizsgált topográfia méretéhez igazodóan történt.

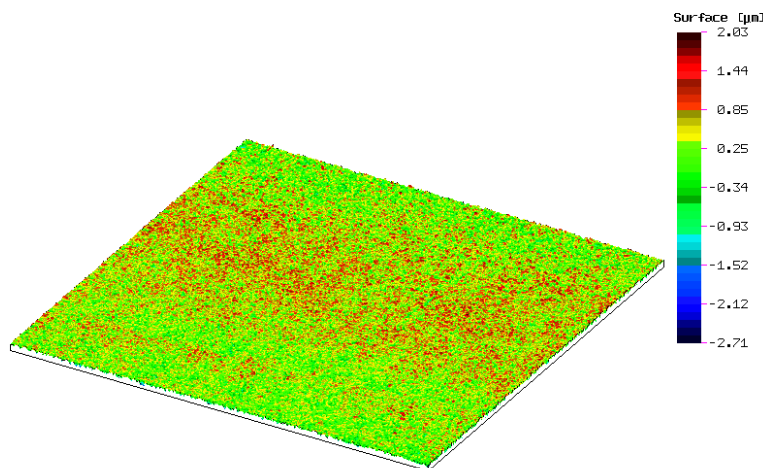
Második lépésként a generált hullámossági felületekre két különböző textúrával rendelkező felület (köszörült és szikraforgácsolt) $R(x,y,z)$ érdességi topográfiáját szuperponáltam. Az érdességi topográfiák mérete 2,5x2,5 mm, a lépésköz mindkét irányban $\Delta x=\Delta y=2,5\mu\text{m}$ volt. A 3.2.3. pontban leírtak alapján ez a lépésköz a kistérközű egyenetlenségek esetében jelenthet ugyan információvesztést, de az összehasonlító értékelésből levont következtetések helytállóságát nem befolyásolja. A vizsgálat célja nem teljes analízis, hanem a ható tényezők kiszűrése, annak feltérképezése, hogy adott mértékű, hullámhosszú hullámosság a működő szűretlen topográfiát miként befolyásolja. A köszörült és szikraforgácsolt topográfiák képét és a topográfiai kiértékelés eredményeit a 4.6. és 4.7. ábrák tartalmazzák.

$sR_a=0,386 \mu\text{m}$
 $sR_z=4,567 \mu\text{m}$
 $sR_{Sk}=-0,681$
 $sR_{Ku}= 3,956$
 $sR_{dq}= 4,299^\circ$
 $sR_{tp}= 0,482$
 $sR_{bi}= 0,715$
 $sR_{ci}= 1,324$
 $sR_{vi}= 0,205$



4.6. ábra. Köszörült érdességi topográfia (2,5x2,5 mm)

$sR_a=0,479 \mu\text{m}$
 $sR_z=4,854 \mu\text{m}$
 $sR_{Sk}=-0,072$
 $sR_{Ku}= 2,690$
 $sR_{dq}= 10,316^\circ$
 $sR_{tp}= 0,418$
 $sR_{bi}= 0,767$
 $sR_{ci}= 1,415$
 $sR_{vi}= 0,164$



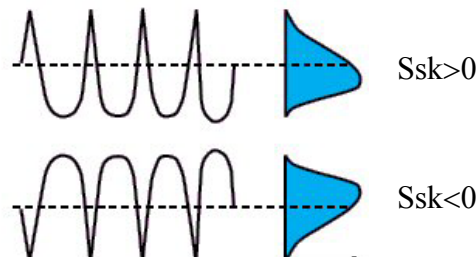
4.7. ábra. Szikraforgácsolt érdességi topográfia (2,5x2,5 mm)

A generált W és a méréssel felvett R topográfia szuperpozíciójával kapott $P(x,y,z)$ szüretlen felületek kiértékelését a Surf3D szoftverrel végeztem. Az analízis alá vont összesen 28 topográfia esetében a működési tulajdonságokat leginkább meghatározó sP_a , sP_z , sP_{Sk} , sP_{Ku} , sP_{dq} , sP_{tp} , sP_{bi} , sP_{ci} , sP_{vi} paramétereket határoztam meg, és hasonlítottam össze a hullámosság nélküli érdességi topográfia sR_a , sR_z , sR_{Sk} , sR_{Ku} , sR_{dq} , sR_{tp} , sR_{bi} , sR_{ci} , sR_{vi} jellemzőivel. (A tp hordozófelületi arány értékét a Surf3D a középsíkon számolja.) A változások mértékéből lehetett következtetéseket levonni a hullámosság működési tulajdonságokra gyakorolt hatására vonatkozóan. A mérési eredményeket a 2. melléklet tartalmazza.

4.1.3 Elemzés, következtetések

- A 4.1. táblázat 1–10. sorszámú hullámhossz kombinációi azonos ($W_a=0,3\mu m$) átlagos hullámosságú felületet eredményeznek. A 2. melléklet 1–10. kiértékelési eredményeinek összehasonlításával tehát a hullámhossz kombinációk hatására vonatkozó következtetéseket vonhatunk le:
 - Azonos sW_a érték mellett, homogén (szikraforgácsolt) felület esetén a különböző irány és hullámhossz variációk hatása közti különbség nem jelentős.
 - Orientált (köszörült) felületnél a hullámosság hatása jelentősebb mértékben függ a hullámhossz kombinációtól az S_a (16–28%; M.2.1. táblázat¹⁶), S_{sk} (0,24–0,50; M.2.6. táblázat), S_{vi} (6%–17%; M.2.8. táblázat) és S_z (4%–15%; M.2.9. táblázat) paramétereknél.
- Az **Sa** átlagos egyenetlenség paraméter értékét a hullámosság a vizsgált tartományban a hullámhossztól függetlenül mindkét megmunkálási módnál közelítőleg azonos mértékben megnöveli (M2.1. és M2.10. táblázatok). A növekedés átlagos értéke $sW_a/sR_a \approx 0,8$ esetén kb. 25%, $sW_a/sR_a \approx 1$ esetén kb. 40%.
- Az **Sbi** hordozófelületi jelzőszám értéke köszörült felületnél átlagosan 8%-al, szikraforgácsolt felületnél átlagosan 5%-al csökkent (M2.2. és M2.11. táblázatok). A hullámosság tehát a hordozótulajdonságokat kismértékben negatívan befolyásolja.
- Az **Sci** magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma kismértékben növekszik, a növekedés átlaga köszörült felületnél 7%, szikraforgácsolt felületnél 3% (M2.3. és M2.12. táblázatok).
- Az **Sdq** felület egyenetlenségeinek közepes hajlása értéket a hullámosság nem befolyásolja (M2.4. és M2.13. táblázatok).
- Az **Sku** lapultsági mérőszám a köszörült a felület esetében csökken (M2.5. táblázat), a csökkenés átlagos mértéke $sW_a/sR_a \approx 0,8$ esetén kb. 18%, ami az sW_a értékkel tovább nő. A növekedés $sW_a/sR_a \approx 1$ esetén 24%, $sW_a/sR_a \approx 1,25$ esetén 30%, A hullámosság tehát az orientációval rendelkező köszörült topográfia egyenetlenségét nem elhanyagolható mértékben rontja. A szikraforgácsolt felület esetében ez a tulajdonság alig változik (M2.14. táblázat).
- Az **Ssk** ferdeségi mérőszám változása igen erőteljes a hullámosság hatására. A paraméter a felületi topográfia amplitudó sűrűségfüggvényének (ADK) alakját – a középsíkhöz viszonyított aszimmetriáját jellemzi. Az M2.6. és M2.15. táblázat adataiból kiolvasható, hogy a köszörült és szikraforgácsolt felületek eredetileg jelentősen különböző értékei egymáshoz közelednek, azaz a hullámosság a két eredeti felület különböző amplitudó sűrűségfüggvény alakjának különbségét "kiegyenlíti".
A köszörült R felület $sR_{sk} = -0,681$ ferdeségi mérőszáma minden esetben pozitív irányban változott (M2.6. táblázat), ami azt jelenti, hogy az ADK görbe asszimmetriája csökkent, a felület kevésbé „telt” jellegű (4.8. ábra).
Ez a hordozótulajdonságok szempontjából kedvezőtlen hatás a köszörült felületnél csak a nagyon kis amplitudójú ($W_a=0,1\mu m$) hullámosság esetében nem számottevő.

¹⁶ 2. Melléklet 1. táblázata



4.8. ábra. A ferdeségi mérőszám és a felület „üres”, ill. „telt” jellegének kapcsolata

A szikraforgácsolt R felület közelítőleg normál eloszlású, ferdeségi mérőszáma nulla közeli ($sR_{sk} = -0,072$). A hullámosság hatására a ferdeségi mérőszám átlagosan 0,2 értékkel negatív irányba tolódik (M2.15. táblázat).

A P felület ferdeségi mérőszámát azonos W_a mellett, különösen a köszörült felületnél erősen befolyásolja a hullámossági topográfia alakja.

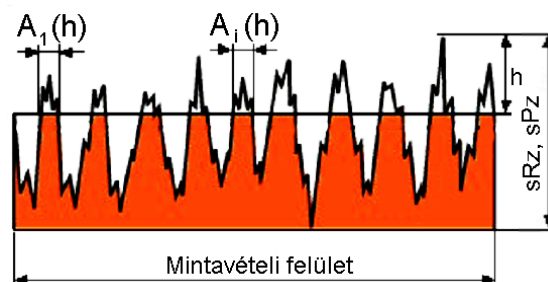
- Az S_z tízpont magasság $sW_a/sR_a = 0,8$ értékig nagy szórással átlagosan kb. 8%-al nő (M2.9. és M2.18. táblázatok). A szórás oka az, hogy az R és W topográfia legmagasabb és legmélyebb pontjainak egybeesése teljesen véletlenszerű. A hullámosság amplitudójának növelésével az sP_z paraméter értéke egyértelműen tovább növekszik, $sW_a = sR_a$ esetén 20% feletti értékű. Az 1. mellékletben részletezett definícióból következően az S_z paraméter igen jó közelítéssel megegyezik a felület legmagasabb és legmélyebb pontjának merőleges távolságával.

- Az S_{tp} középsíkon meghatározott hordozófelületi arány értékét a hullámosság lényegesen nem befolyásolja (M2.7. és M2.16. táblázatok). Az S_{tp} paraméter definíciójából adódóan a hullámosság működési tulajdonságokra gyakorolt hatása viszont ebből a szempontból sem elhanyagolható. Egy adott h metszési magassághoz tartozó hordozófelületi arányt úgy kapjuk, hogy a felületet a középsíkkal (vagy nem sík felületek esetén az illeszkedő polinomiális felülettel) párhuzamos felülettel h magasságban elmetsszük, és az így kapott metszési felület nagyságát a mintavételi felület nagyságához viszonyítjuk:

$$S_{tp}(h) = \frac{\sum A_i(h)}{(M-1) \cdot (N-1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y},$$

ahol $\sum A_i$ a metszett felület, M és N az x és y irányú pontok száma, Δx és Δy pedig a lépésközöket jelöli.

Mivel $sW_a/sR_a \geq 1$ esetben a topográfia legmagasabban és legmélyebben lévő pontjainak merőleges távolságát jelentő sP_z érték a hullámosság hatására 20%-ot meghaladó mértékben nő, azonos $\sum A_i$ hordozófelület a P profil esetében hasonló arányban nagyobb h metszési magasságnál adódik (4.9. ábra). Sűrűlódó felületek esetében ez azt jelenti, hogy a hullámosság hatására ugyanaz a hordozófelület nagyobb kopást követően alakul ki.



4.9. ábra. A h metszési magasság és a $\sum A_i$ hordozófelület kapcsolata

- Az S_{vi} völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám értéke a kis amplitúdójú ($s_{Wa}/s_{Ra} \leq 0,5$) hullámosság esetében alig változik (M2.8. és M2.17. táblázatok). A hullámosság amplitúdójának növelésével az S_{vi} értéke mindkét felületnél folyamatosan csökken, $s_{Wa}/s_{Ra} \geq 1$ esetén a csökkenés mértéke 10–17%.
A hullámosság tehát a völgyzóna kenőanyagmegtartó képességét egyértelműen negatív irányban befolyásolja, a hatás $s_{Wa}/s_{Ra} \geq 1$ értéknél számottevő.

Az elvégzett vizsgálatok alapján a hullámosság mikrotopográfiai jellemzőkre gyakorolt hatása az alábbiakban foglalható össze:

Azonos s_{Wa} érték mellett, homogén (szikraforgácsolt) felület esetén a különböző irány és hullámhossz variációk a topográfiai paramétereket nem változtatják jelentős mértékben. Orientált (köszörült) felületnél a hullámosság hatása jelentősebb mértékben függ a hullámhossz kombinációktól.

Kis amplitúdójú hullámosság ($s_{Wa}/s_{Ra} \leq 0,5$) alig befolyásolja a működési paramétereket, kivéve S_{sk} ferdeségi mérőszámot.

Nagyobb amplitúdójú hullámosság ($s_{Wa}/s_{Ra} \geq 0,6$) általában az amplitúdótól függő mértékben valamennyi topográfiai paraméterre hatással van, kivéve a felület átlagos hajlását (S_{dq}), melyet a hullámosság lényegében nem befolyásol.

A hullámosság jelentős mértékben befolyásolja a magasságeloszlási görbét jellemző S_{sk} és S_{ku} paramétereket. Számos szerző szerint [SeBjAn02, Sp96] ezek a felületet jellemző legfontosabb paraméterek közé tartoznak, tehát a hullámosság kiszűrésével kapott topográfia paraméterei a működési tulajdonságok jellemzésére önmagukban nem elegendők. Az érdességi paraméterek mellett a hullámossági paramétereket is meg kell adni, vagy pedig a felületet a szűretlen (P) topográfiából számított paraméterekkel kell jellemezni.

Ezt a megállapítást alátámasztja a 2.2. fejezetben ismertetett 2D-s mérési eredmény is. A harckocsiba beépített tengelykapcsoló tárcsa működő felületén mért szűretlen ($P=R+W$) és szűrt (R) profilok hordozófelületi görbéinek jellege között jelentős különbség van (2.2. ábra). Több kutató [CoPaPe99, SeBjAn02] véleménye szerint a hordozófelületi görbe lineáris szakaszának meredeksége meghatározza a felület teherviselő képességét. A vizsgált alkatrész működő felületén ez az érték a hullámosság nélkül (R profil) $0,005 \mu\text{m}/\%$, a hullámossággal (P profil) pedig $0,0125 \mu\text{m}/\%$. A hullámosság figyelmen kívül hagyásával tehát a működési tulajdonságokra vonatkozó következtetéseink tévesek lehetnek.

4.1.4 Összegzés

A hullámosság és a működési tulajdonságokat jellemző 3D-s paraméterek összefüggéseinek vizsgálatára új módszert dolgoztam ki, amely a felületi mikrotopográfia hullámosság-komponensét matematikai úton generálja.

Az új módszer használhatóságának igazolására generált hullámossági és valós érdességi topográfiákat tartalmazó felületek esetében vizsgáltam a hullámosság működési paraméterekre gyakorolt hatását.

A módszer a vizsgálatra alkalmas módszernek bizonyult, segítségével a hullámosság és a működési tulajdonságokat jellemző paraméterek kapcsolatára következtetések vonhatók le.

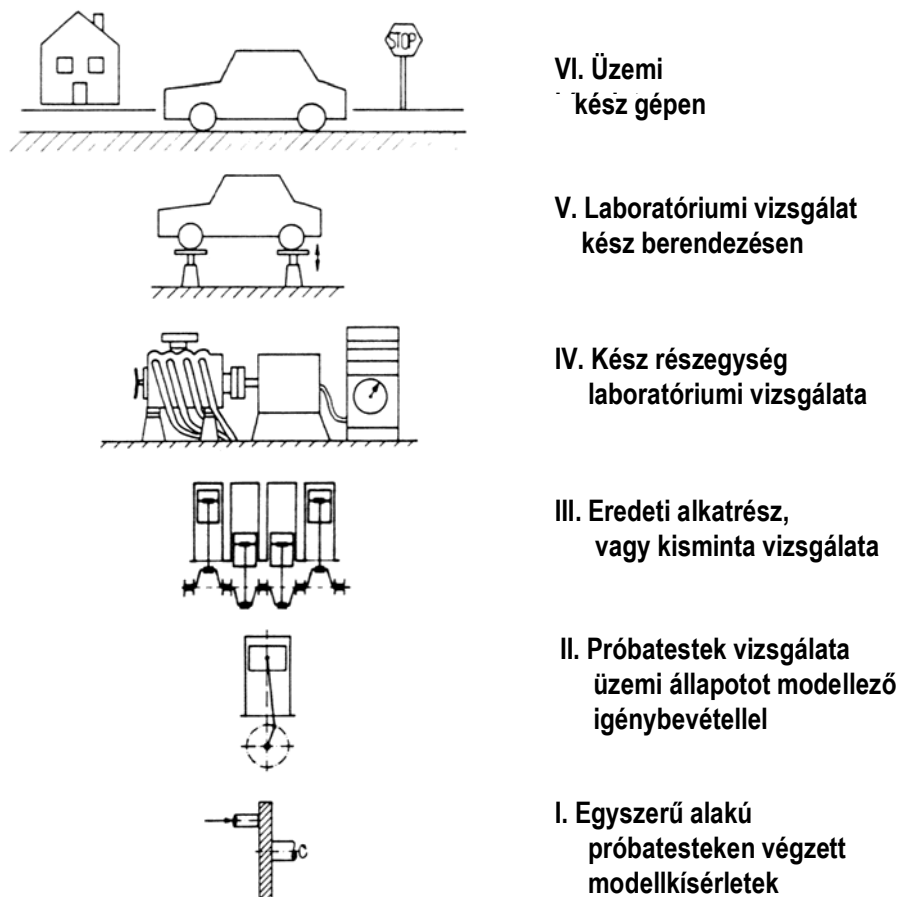
4.2 A hullámosság és a kopási folyamat kapcsolata

4.2.1 A kopás kísérleti vizsgálata

A kopás az ASTM¹⁷ szerint: a szilárd test felületének anyagvesztéssel járó károsodása a felület relatív elmozdulásának következményeként. Raja és társai [RaMuFu02] hangsúlyozták, hogy a kapcsolódó felületeken végbemenő folyamatok összehasonlíthatókká válnak a felületi érdesség és hullámosság vizsgálata révén.

Napjaink kopási vizsgálatait éppúgy jellemzik a sokparaméteres kopási modellek, mind a kísérleteken alapuló gyakorlati kutatások. Számos szerző próbált és próbál összefüggést felállítani a felületek érdessége és a kopási folyamat között. Czifra dolgozatában [Cz07] részletes szakirodalmi áttekintést és elemzést közöl a felületi érdesség feldolgozás-technikájáról és kopási vizsgálatokban való alkalmazásáról, és megállapítja, hogy a kopással kapcsolatos vizsgálatok a tudomány és technika mai állása mellett is elsősorban kísérleteken, koptató teszteken alapulnak.

A tribológiai kísérleti vizsgálatoknak általában hat szintjét különböztetjük meg (4.10. ábra). Az alsóbb szintű vizsgálatoktól felfelé haladva egyre pontosabban vagyunk képesek modellezni a valóságot, ugyanakkor a folyamatok egyre bonyolultabbá válnak, a kézbentartás egyre nehezebb, a megismételhetőség romlik. A vizsgálat idő- és költségigénye is alulról felfelé nő.



4.10. ábra. Tribológiai vizsgálatok osztályozása [Ga87]

¹⁷ American Society for Testing and Material

Bushan [Bu01] a tribológiai vizsgálatok céljait az alábbiakban fogalmazta meg:

- anyagok minősítése egy létező szerkezethez,
- anyagkiválasztás egy új konstrukcióhoz,
- a működő felületek megválasztási módjának kiválasztása,
- egy anyag kopási, súrlódási jellemzőinek, viselkedésének feltárása,
- kopási, súrlódási jelenségek tanulmányozása.

Céлом volt a felületi hullámosság és a kopás összefüggéseinek vizsgálata száraz súrlódási körülmények között. Ennek megfelelően a leginkább kézben tartható I. kísérleti szinten végeztem vizsgálatokat a következő fejezetben ismertetésre kerülő koptatóberendezés segítségével.

4.2.2 A koptatóberendezés

A kísérletekhez használt „Friction wearing tester” nevű koptatóberendezés a BMF-BGK és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszékének közös fejlesztése (lásd 4.11. ábra).

A műszer felső, álló részébe befogható a henger, golyó, vagy speciális alakú próbatest. Ezen részek maximálisan 2000N erővel szoríthatóak az alternáló mozgást végző munkaasztalra. Az asztal sebessége 15, 25, és 50 mm/s lehet, a maximális úthossz 250 mm. A terhelőerő, a kívánt vizsgálati sebesség, valamint a teljes vizsgálati úthossz a vezérlőprogram számára a mérés előtt megadható. A felfogható próbatestnek téglatest alakúnak, szalagszerűnek kell lennie. A műszert PC vezérli egy National Instruments gyártmányú univerzális kártyán, illetve egy speciális cél-illesztőegységen keresztül.

A 4.11. ábrán alul látható a készülékalap a golyósorsóval mozgatható tárgyasztallal, jobbra a hajtóművel egybeépített vontatómotor. Középen látszik az oszlop a terhelőegységgel, balra a kétkomponenses erőmérőfej a próbatest befogóval. A készüléket részletesen a [BoPaPá06] publikáció ismerteti.

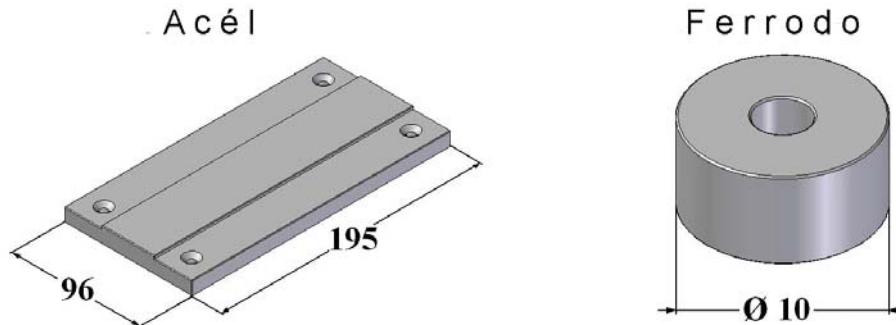


4.11. ábra. A Friction wearing tester

A próbadarabok melegen hengerelt ötvözt (55Si7) hőkezeletlen acéllapokból marással készültek (4.12. ábra), a koptatni kívánt acél felületeket pedig síkköszörüléssel meghatározott felületi

minőségűre munkáltuk a várt koptatási irányra merőleges és párhuzamos irányokban. A finomabb (F jelű) felületek átlagos érdessége $Ra=0,2\ \mu\text{m}$, a durvábbaké (D jelű) pedig $Ra=1,96\ \mu\text{m}$ volt.

A koptató gép felső részébe befogott ferdo próbadarab a befogó egység befogadó méreteire esztergálással lett kialakítva (4.12. ábra), és a hátoldalára furat készült a hőmérsékletmérő számára.



4.12. ábra. A vizsgált próbatetek

A négy próbatest koptatása először 1000N-os terhelőerővel és 50 mm/s csúszási sebességgel történt, mind a finom, mind a durva kiinduló felületek esetén merőleges és párhuzamos irányokban egyaránt.

4.2.3 A hullámosság hatását vizsgáló koptatókísérletek

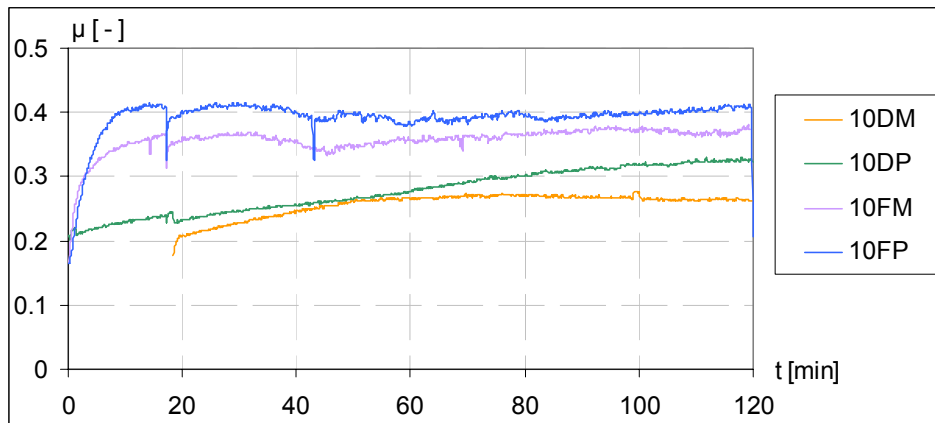
A kopási folyamatot két szakaszban vizsgáltam. Először a finom megmunkálású ($Ra=0,2\ \mu\text{m}$) felülettel végzett előkísérlet alapján becsült bekopásig, 15 percig koptattam, majd további 105 percig folytattam a műveletet.

A koptatási folyamatot minden esetben megelőzte egy felületi mikrotopográfiai vizsgálat, amit bekopás után (15 perc elteltével), majd a folyamat végeztével (2 óra kopási időnél) ismét elvégeztem. A mérések a Mahr Perthometer Concept típusú tapintófejes mérőkészüléken történtek. Mindkét mintadarabról 2–2 mérés készült a kopási folyamat különböző fázisaiban a felület azonos részéről. A mérési beállítások a következők voltak:

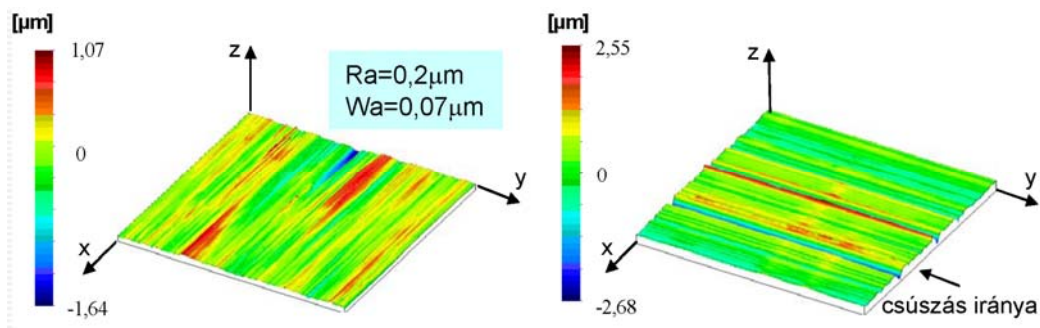
- letapogatott felület: 1x1 mm,
- tapintó méréshatára: $\pm 25\ \mu\text{m}$,
- vontatási sebesség: 0,5 mm/s,
- felvett pontok száma: 500x500.

A koptatóberendezésen online mért súrlódó és összeszorító erőkből meghatározható a súrlódási tényező, melynek változását a kopás időtartama alatt a 4.13. ábra mutatja. Az ábrán látható jelölések értelmezése a következő: D-durva, F-finom, M-csúszási irányra merőleges megmunkálás, P-csúszási iránnyal párhuzamos megmunkálás, 10–1000N összeszorító erő.

A diagram jelentős eltérést mutat a különböző kiindulási topográfiajú darabok súrlódási tényezőiben. A „finom” felületi megmunkálások esetén viszonylag hamar (20 min után) konstans értéket vesznek fel a görbék, míg a „durva” felületek esetén a súrlódási tényező emelkedése figyelhető meg.

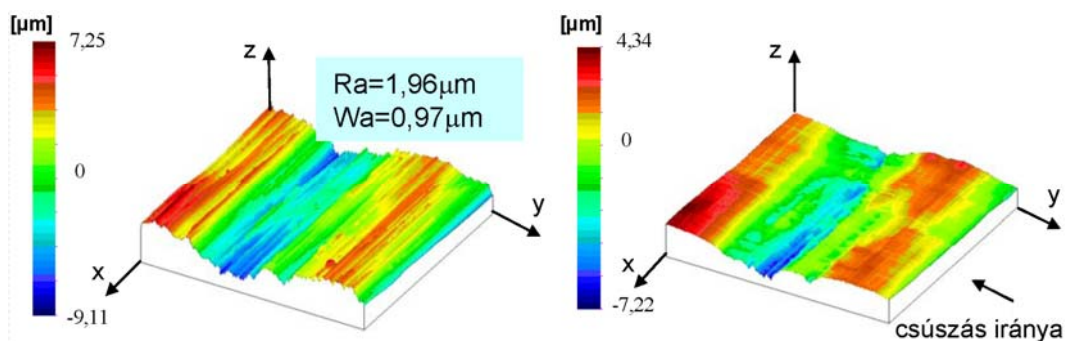


4.13. ábra. A súrlódási tényező alakulása a kopási folyamat során 1000N terhelőerő esetén



4.14. ábra. A merőleges megmunkálású „finom” felületi érdességű darab topográfiája a koptatás előtt (balra) és a koptatás után (jobbra)

A működési viszonyok különbözősége és változása jól köthető a mikrotopográfia eltéréseihez és változásaihoz. A 4.14. ábra mutatja a merőleges megmunkálású „finom” felületi érdességű darab topográfiáját a kopás előtt és 120 min koptatás után, míg a 4.15. ábra szemlélteti a „durva” topográfia kopás előtti és utáni állapotát. Megfigyelhető, hogy míg a „finom” felület esetén az eredeti megmunkálási nyomok eltűntek, új, bejáratott topográfia alakult ki, addig a nagyobb hullámossággal rendelkező „durva” felület esetén ezek a változások kizárólag a csúszózáron környezetét érték, a bekopás nem fejeződött be. Ezzel magyarázható a súrlódási tényező folyamatos emelkedése.



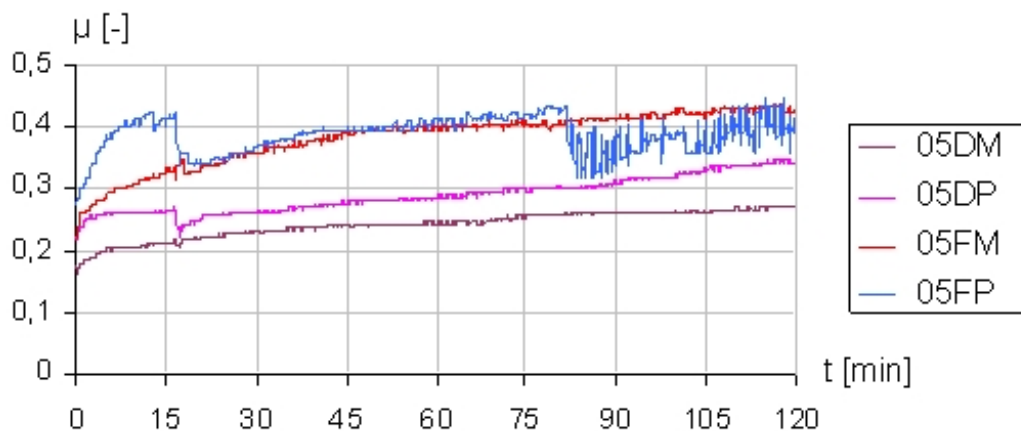
4.15. ábra. A merőleges megmunkálású „durva” felületi érdességű, hullámos darab topográfiája a koptatás előtt (balra) és a koptatás után (jobbra)

A súrlódási tényezők jelentős eltéréseinek magyarázata az eltérő nagyságú valós érintkezési tartományokkal hozható összefüggésbe. Bowden, Tabor és Kragelszkij súrlódási elméleteiben a

súrlódó erő egy deformációs és egy adhéziós részből tevődik össze. A deformációs összetevő függ az érintkezésben lévő érdességcsúcsok számától, méretétől és alakjától, míg az adhéziós összetevő közvetlen összefüggésben van a valós érintkezési tartománnyal [Ko94].

A topográfiai lokális maximumainak számában a finom és durva felület esetén mindössze 15% eltérést volt (durva felület esetén 7731 lokális maximum, míg finom felületnél 8971 lokális maximum). Feltételezhető, hogy durva megmunkálás esetén a 4.15. ábrán jól megfigyelhető nagy mértékű hullámosság miatt az érdességcsúcsok jelentős része nem kerül kapcsolatba, a valós érintkezési tartomány lényegesen kisebb, mint a kisebb hullámosságú finom megmunkálás esetén.

A koptatókísérletet 500 N terhelőerővel megismételtem, a súrlódási tényezők értékének változását a 4.16. ábra mutatja. Az ábrán látható jelölések értelmezése: D-durva, F-finom, M-csúszási irányra merőleges megmunkálás, P- csúszási iránnyal párhuzamos megmunkálás, 05–500N összeszorító erő. A változások jellege a párhuzamos megmunkálású finom felületnél (05FP) fellépő rezgéstől eltekintve teljesen hasonló, mint 1000N terhelőerő esetén (4.13. ábra).



4.16. ábra. A súrlódási tényező alakulása a kopási folyamat során 500 N terhelőerő esetén

4.2.4 Modellezés a Persson elmélet alapján

A szakirodalomban számos analitikus érintkezési modellel találkozhatunk. Napjaink egyik vezető elmélete a Persson nevével fémjelzett, a felületi mikrotopográfiát figyelembe vevő érintkezési elmélet [Pe02]. Alapelve, hogy az érintkező felület teljes hullámhossz spektrumát figyelembe kell venni a tényleges érintkezési viszonyok meghatározásához. A Persson-féle elmélet ehhez a felület hullámhossz információit megjelenítő amplitúdó sűrűség spektrumot (PSD) használja. A valós (A) és névleges (A_0) érintkezési tartomány arányának meghatározására az alábbi összefüggést adja:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{2}{\pi} (1 - \nu^2) \frac{F_N}{E} \frac{1}{\sqrt{\int_0^{\infty} q^3 A(q) dq}}, \quad (4.6)$$

ahol ν Poisson tényező, E rugalmassági modulusz, F_N terhelőerő, q frekvencia és $A(q)$ az amplitúdó sűrűség spektrum (PSD). Az $A(q)$ függvény 3D-s meghatározása diszkrét Fourier transzformációval történik az alábbi összefüggés szerint:

$$F(\lambda_p, \lambda_q) = \Delta y \cdot \Delta x \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(x_i, y_j) e^{-j2\pi \left(\frac{x_i}{\lambda_p} + \frac{y_j}{\lambda_q} \right)} \quad (4.7)$$

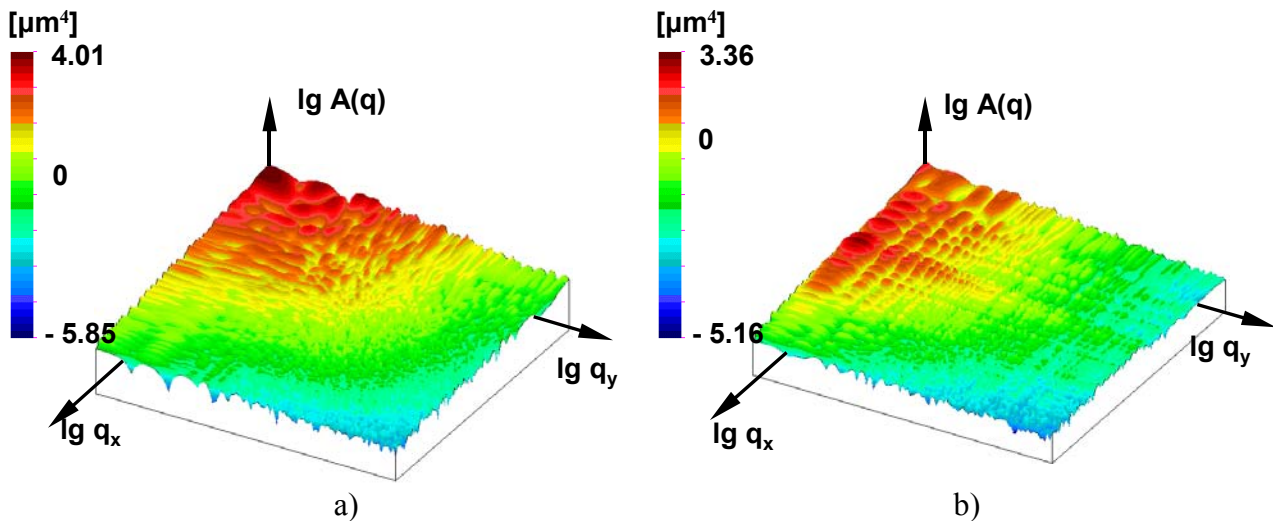
ahol λ_p, λ_q a p-edik és q-adik hullámhossz ($\lambda_p=1/q_p, \lambda_q=1/q_q$), $f(x_i, y_j)$ az (x_i, y_j) pont magassági koordinátája, M a profil pontjainak száma, N a profilok száma és $\Delta x, \Delta y$ az x , illetve y irányú lépésköz. Így a PSD amplitúdó:

$$A(\lambda_p, \lambda_q) = \frac{F(\lambda_p, \lambda_q)F^*(\lambda_p, \lambda_q)}{MN\Delta x\Delta y} = \frac{\text{Re}^2(F(\lambda_p, \lambda_q)) + \text{Im}^2(F(\lambda_p, \lambda_q))}{MN\Delta x\Delta y} \quad (4.8)$$

Az elmélet rugalmas esetre és tökéletes merev síkkal történő érintkezésre ad eredményt. A vizsgált probléma túllép ezeken a kereteken, ugyanakkor feltételezhető, hogy az eltérő mikrotopográfiák Persson-féle elméleten alapuló összevetése hasznos eredményekkel szolgálhat. Ezért a 3D-s PSD topográfiák meghatározása után az egyes topográfiákra kiszámoltam a (4.6)-es összefüggés mikrotopográfiát figyelembe vevő, T-vel jelölt részét:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\int_0^\infty q^3 A(q) dq}} \quad (4.9)$$

Az 1000 N terhelőerővel megvalósított 2 óra kopás után mért topográfiák esetén kiszámított értékeket minden esetben a legnagyobb súrlódási tényezőjű, „finom” megmunkálású és párhuzamos irányban koptatott, FP jelű felület esetén meghatározott értékkel vettem össze. A merőleges irányban koptatott durva és finom felület PSD topográfiáját mutatja a 4.17. ábra, míg a 4.2. táblázat foglalja össze az eredményeket. A 4.17. ábrán a logaritmikuskálán ábrázolt PSD topográfiák hasonló jellegűek, de a 4.2. táblázat mutatja, hogy a belőlük számolt integrálok jelentősen eltérnek.



4.17. ábra. a) Durva (DM) b) finom (FM) koptatás utáni felület PSD topográfiája
50x50 adatpont, $q_{\min}=0.001$ 1/μm, $q_{\max}=0.25$ 1/μm

A finom felület esetén, összhangban a kopás utáni topográfiával, határozott az orientáció az y irányban, míg a durva felületnél, ugyancsak összhangban a topográfiai képpel, x irányban is orientált a felület.

i (próbatest)	T_i/T_{FP}	μ_i/μ_{FP}
FM	$63\pm 5\%$	92 %
DP	$48\pm 5\%$	80 %
DM	$46\pm 5\%$	63 %

4.2. táblázat. A PSD integrálok és a súrlódási tényezők aránya

A 4.2. táblázat eredményei megerősítik azt a feltételezést, hogy a súrlódási tényezők értéke a valós érintkezési felület révén függ a működő topográfiáktól. Az összefüggés ugyan nem lineáris, de határozottan megfigyelhető, hogy a legnagyobb súrlódási tényezőjű FP jelű felület esetén a T érték a legnagyobb, míg az FM, DP és DM jelűek esetén a súrlódási tényezőhöz hasonlóan lényegesen kisebbre adódott.

A nem lineáris kapcsolatot oka lehet, hogy a μ értékek a teljes felület súrlódási viselkedését tükrözik, míg a T értékek csak 2db 1x1 mm-es topográfia részlet jellemzői. Az azonos felületről felvett 2–2 db topográfia T értékének szórása kb. 10% volt.

4.2.5 Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- Száraz súrlódás esetén a súrlódási tényező függ a kiinduló felület minőségétől, beleértve a hullámosságot is.
- Durva, hullámossági komponenst is tartalmazó felületek esetén a vizsgált körülmények között a súrlódási tényező emelkedése figyelhető meg, finom felületei megmunkálások esetén viszonylag hamar (20 min után) a súrlódási tényező konstans értéket vesz fel.
- A topográfia teljes hullámhossz spektruma hatással van a működési folyamatra, ezért vagy a teljes felületet jellemző P paraméterek, vagy pedig R érdességi és W hullámossági paraméterek együttes előírása szükséges.

5 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

5.1 Tézisek

I. TÉZIS

Az érdességi (R) paraméterek előírásánál az EN ISO 1302 nem teszi kötelezővé az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló szűrő λ_c határhullámhosszának megadását, amennyiben annak meghatározására az előzetesen megbecsült érdességi paraméterek alapján az EN ISO 4288 szabvány szerint került sor. A 3.4. fejezetben ismertetett mérésekkel bizonyítottam, hogy a szabványra való utalás nem elegendő, a szabványoknak megfelelően végrehajtott mérések eredményei között akár többszáz százalékos különbségek is előfordulhatnak. Ezért minden esetben szükségesnek tartom a határhullámhosszak előírását.

II. TÉZIS

A hullámosság kiértékelését jelenleg nehezíti egyes mérési feltételek rögzíthetlensége. Az egyértelmű kiértékelhetőség érdekében saját mérési eredményeim, illetve szakirodalmi utalások alapján javaslatokat dolgoztam ki.

a) A mintavételi távolság (lépésköz) hullámossági paraméterekre gyakorolt hatását a 3.2.3 fejezetben ismertetett mérésekkel vizsgáltam. Eszerint a hullámossági profil, illetve felület felvétele során az információvesztés, valamint a rendkívül nagy adathalmazból adódó mérési- és kiértékelési problémák elkerülése érdekében a mintavételi távolságot az alábbiak szerint javaslom megválasztani:

- $\lambda_c \geq 0,25$ mm cut-off esetén elegendő a $\Delta x(\Delta y) = 10$ μ m lépésköz,
- finoman megmunkált felületeknél, ahol az érdességi paraméterek kis értéke miatt az érdességet leválasztó szűrő cut-offja $\lambda_c = 0,08$ mm, $\Delta x(\Delta y) = 5$ μ m mintavételi távolság szükséges.

Mérésekkel igazoltam, hogy a javasolt mintavételi távolságok esetén nem lép fel a hullámosság kiértékelésének eredményét befolyásoló információvesztés.

b) A hullámosság értékelési szakaszára (l_w) és értékelési hosszára (l_n) csak a motif-kiértékelésre vonatkozó szabványelőírás létezik. A gyakorlatban általánosan használt középvas rendszerben az érvényes EN ISO 4287 szabvány csupán annyit ír elő, hogy a hullámosság értékelési hossza egy vagy több értékelési szakaszból áll, az értékelési szakaszt az alakszűrő λ_f határhullámhosszával azonos értékűre kell választani, de λ_f értéke nincs meghatározva. A 3.2.4 fejezetben ismertetett mérési eredményeim kiértékelése alapján az alábbi értékeket javaslom:

- hullámosság értékelési szakasza: $l_w = 10 \lambda_c$,
- hullámosság értékelési hossza: $l_n = l_w$ vagy $l_n = 2 \cdot l_w$.

A javaslat igazodik a szabványelőíráshoz, ugyanakkor megadja a kiértékeléshez szükséges, a szabványból hiányzó összefüggéseket.

III. TÉZIS

A hullámosság és a működési tulajdonságokat jellemző 3D-s paraméterek összefüggéseinek vizsgálatára új módszert vezettem be: A kidolgozott eljárással matematikailag generált hullámossági felületekre valós, méréssel felvett érdességi topográfákat szuperponálva, tág határok közti nagyterközű egyenetlenséget tartalmazó topográfák hozhatók létre. A módszer jelentős mértékben megkönnyíti a hullámosság működési paraméterekre gyakorolt hatásának vizsgálatát, mivel a különböző hullámossági topográfiával rendelkező valós felületek legyártása csak hosszadalmas és költséges eljárás keretében lenne lehetséges.

Az új módszer használhatóságának igazolására generált hullámossági és valós érdességi topográfákat tartalmazó felületek esetében vizsgáltam a hullámosság működési paraméterekre

gyakorolt hatását (4.1.2 fejezet). Az általam vizsgált esetekben a hullámosság 3D-s paraméterekre gyakorolt hatása a következőkben foglalható össze:

- Nagyobb hullámosság ($Wa/sRa > 0,5$) általában az amplitudótól függő mértékben Sdq és Stp kivételével valamennyi topográfiai paraméterre hatással van.
- Jelentős mértékű a magasságeloszlási görbét jellemző, és a felület működési tulajdonságával összefüggésben lévő Ssk ferdeségi mérőszámra gyakorolt hatás, amely már kis hullámosság ($sWa/sRa \leq 0,5$) esetén is jelentkezik.
- Az Stp hordozófelületi arány számértéke a hullámosság hatására ugyan alig változik, de a topográfia nagyobb magassága következtében a kis változás is megváltozott működési tulajdonságokat jelent.
- Az Sdq felület átlagos hajlása paraméter értéke lényegében csak az érdességtől függ, a hullámosság hatása nem számottevő.
- Kis amplitúdójú hullámosság ($sWa/sRa \leq 0,5$) a vizsgált paraméterekre az Ssk ferdeségi mérőszám kivételével nem gyakorol lényeges hatást.

Az új módszer alkalmasnak bizonyult a hullámosság és a 3D-s hullámossági paraméterek kapcsolatának vizsgálatára.

IV. TÉZIS

Koptatókísérleteket végeztem azonos működési körülmények között acél-ferrodo anyagpár esetén annak érdekében, hogy a kiinduló mikrotopográfia súrlódásra gyakorolt hatását vizsgáljam. Vizsgálataim eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy a kopási folyamat kezdeti szakaszában a súrlódási tényező jelentősen függ a kiinduló mikrotopográfiától: kisebb hullámossággal és érdességgel rendelkező felület esetén lényegesen nagyobb súrlódási tényező volt mérhető, mint nagyobb érdességű és hullámosságú topográfiáknál.

Persson analitikus modelljét használva megállapítottam, hogy a rugalmas érintkezés tartományában a nagyobb hullámossággal rendelkező felületen kisebb valós érintkezési tartomány alakul ki, mint a kisebb hullámosságú felület esetén.

5.2 Az eredmények hasznosításának lehetőségei

Az értekezésben a hullámosság jelentőségének bemutatásával, a különböző rendű egyenletlenségek szétválasztására szolgáló korszerű módszerek elemzésével, a hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzési lehetőségeinek elemző ismertetésével átfogó képet nyújtok a felületi hullámosságról a tervezésben, gyártásban és minőségellenőrzésben dolgozó szakemberek számára.

Az eredmények feloldják az érvényes szabványokban meglévő hullámossággal kapcsolatos mérés technikai ellentmondásokat, amelyek a hullámosság egyértelmű, összehasonlítható értékeket eredményező kiértékelését jelenleg nem teszik lehetővé. Az értekezés eredményei megoldást jelentenek a hullámosság-kiértékelés technika eddig nem, vagy nem kellően szabályozott területein is. Az eredmények ilyen módon a hullámosság mérés gyakorlatában, valamint a szabványosítás során egyaránt hasznosíthatók.

A kifejlesztett hullámossági felületet generáló szoftver jól használható eszköz a hullámosság működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálatához, segítségével további kutatások folytathatók.

Az értekezés rávilágít a hullámosság és a működés kapcsolatára. Az irodalom feldolgozása alapján levont következtetések és a saját kutatási eredmények hozzájárulnak ahhoz, hogy a felületi hullámosság a tervezés, gyártás és minőségvizsgálat során az ipari gyakorlatban és a szövetség

(Észak-atlanti Szerződés Szervezete) haditechnikai eszközeinek tervezésében, gyártásában és üzemfenntartásában a jelenleginél nagyobb hangsúlyt kapjon.

A USACE 2.1. pontban már idézett, az Amerikai Egyesült Államok hadserege számára készített tanulmánya [De99] is kiemeli a felületi hullámosság és érdesség által meghatározott valós és a névleges érintkezési tartomány közötti különbség tribológiai jelentőségét.

Katonai fegyverzeti szakértők személyes konzultációk során több olyan konkrét katonai alkalmazási területet neveztek meg, ahol a felületi mikrogeometria a működés szempontjából kiemelt fontosságú. Ezek közül néhány a teljesség igénye nélkül:

- A ballisztikai elven működő haditechnikai eszközök (kézi lőfegyverek és tüzérségi eszközök) egyes szerkezeti elemei működésük során nagy hőterhelési, súrlódási igénybevételnek vannak kitéve. A záruk és zárszerelvények felületének (zárfelület, peremágy, a jelenlegi és rendszeresítendő lövegeknél az ékzárak zártükre) igénybevétele és működési viszonyai a tervezéssel és gyártással szemben is fokozott követelményeket támasztanak, szükségessé teszik a hullámosságot is tartalmazó felületi mikrogeometria tervezését és kiértékelését.
- A fegyvercsövek belső felületének kopása az üzembentartás oldaláról ugyancsak folyamatos felügyeletet igényel, a minősítés eszköze felületi mikrogeometria teljeskörű (érdességre és hullámosságra is kiterjedő) kiértékelése lehet.

A hullámosság értelmezésével és kiértékelésével, valamint a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztásával foglalkozó korszerű és átfogó tananyag nem áll rendelkezésre, az értekezés a polgári és katonai műszaki felsőoktatásban egyaránt felhasználható, mint alaptananyag.

IRODALOMJEGYZÉK

Hivatkozott irodalom

- [Ba00] Balogh, T.: **Kopási folyamatok és azok diagnosztizálása**, BME GEK, PhD értekezés, Budapest, 2000.
- [Ba03] Bakolas, V: **Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces**, *Wear* 254, p 546–554, 2003.
- [Ba07] Balogh T: **Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata**, BME GEK, PhD értekezés, Budapest, 2007.
- [BaLo00] Barré, F., Lopez, J: **Watershed lines and catchment basins: a new 3D-motif method**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 8, p. 1171–1184, June 2000.
- [BaLo01] Barré, F., Lopez, J: **On a 3D extension of the MOTIF method (ISO 12085)**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41, p. 1873–1880, 2001.
- [Bl01] Blau, P. J.: **The significance of the friction coefficient**, *Tribology International* 34, p. 585–591, 2001.
- [Bl03] Blunt, L., Xiangqian, J.: **Advanced Techniques for the Assessment of Surface Topography**, Kogan Page Science, ISBN 1903996112, 2003.
- [Bl06] Blateyron, F.: **New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology**, *Quality Magazine*, White Paper, May 15 2007.
- [BlJiLe08] Blunt, L., Jiang, X., Leach R., Harris, P., Scott, P.: **The development of user-friendly software measurement standards for surface topography software assessment**, *Wear*, Vol. 264, Iss. 5–6, p. 389–393, 2008.
- [Bo81] H. Bodschwinna, H.: **Oberflächenwelligkeit – Stand der Entwicklung**. *DIN-Mitteilungen*, p. 687–691, 11/1981.
- [Bo83] Boulanger, M. J.: **Une nouvelle méthode de calcul des critères d'état de surface**. *Ingénieur de l'Automobile*, p. 60–71, 3/1983.
- [Bo92] **Boulanger, J.:** The “Motifs” method: **An interesting complement to ISO parameters for some functional problems**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 32, Issues 1–2, p. 203–209, February-April 1992.
- [BoPaPá06] Bollók, P.; Palásti K., B. ; Pálincás, T.: **„Friction wearing tester” for testing rubbing surfaces**, *Gépészet* 2006, 5th conference on mechanical engineering, Budapest, Hungary, 2006.
- [BoSe96] Bodschwinna, H., Seewig, S.: **Moderne Methoden der Signalverarbeitung zur Welligkeitsmessung durch Abgrenzung des Welligkeitsanteils gegenüber Rauheit und Form**. In: *Tagungsband IX. Internationales Oberflächenkolloquium*. Chemnitz, S. 79–91, 29- 31. Januar 1996.
- [BrMoFe04] Bruzzone, A. A. G., Montanaro, J. S., Ferrando, A., Lonardo, P. M.: **Wavelet Analysis for surface Characterisation: an Experimental Assessment**, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Volume 53, p. 479–482, 2004.

- [BrTeYo98] Bryant, M. D., Tewari, A., York, D.: **Effects of micro (rocking) vibrations and surface waviness on wear and wear debris**, Wear, Vol. 216, Iss. 1, p. 60–69, 1998.
- [Bu01] Bushan, Bahrat: **Modern Tribology Handbook**, CRP Press LLC, Boca Raton, London, New York, Washington D. C. 2001.
- [BuReVo04] Buia, S. H., Renegara, T. B., Vorburger, T. V., Jay Raja, J., Mark C. Malburg, M. C.: **Internet-based surface metrology algorithm testing system**, Wear Vol. 257, Iss. 12, p. 1213–1218, 2004.
- [Ch99] De Chiffre, L.: **Industrial survey on ISO surface texture parameters**, Annals of the CIRP, 48/3, p. 74–77, 1999.
- [ChBaDi07] Chamoli, A., Bansal, A. R., Dimri, V. P.: **Wavelet and rescaled range approach for the Hurst coefficient for short and long time series**. Computer & Geosciences 33, p. 83–93, 2007.
- [ChKoJe02] Cho, Y. J., Koo, Y. P., Jeon, J. H.: **Surface profile estimation by digital filtering for wear volume calculation**, Wear 252, p. 173–178, 2002.
- [ChKuPe03] De Chiffre, L., Kunzmann, H., Peggs, G. N., Lucca, D. A., **Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology**, Annals of the CIRP, 52, No. 2, p. 561–577, 2003.
- [ChLoTr00] De Chiffre, L., Lonardo, P., Trumpold, H., Lucca, D. A., Goch, G., Brown, C. A., Raja J., Hansen, H. N.: **Quantitative Characterisation of Surface Texture**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 2, p. 635–652, 2000.
- [ChYaLi99] Chen, Q., Yang S., Li Z.: **Surface roughness evaluation by using wavelets analysis**, Precision Engineering, Volume 23, Issue 3, p. 209–212, 1999.
- [ClVe04] Clarysse, F., Vermeulen M.: **Characterizing the surface waviness of steel sheet: reducing the assessment length by robust filtering**, Wear 257, p. 1219–1225, 2004.
- [CoPaPe99] Coutlas, G., Pandazaras, C., Petropoulos, G.: **Numerical Modelling of the Behaviour of various Type Finite Journal Bearings under Dynamic Loading**, Journal Tribology in Industry, Vol. 21, p. 90–102, 1999.
- [Cz02] Czifra, Á.: **A felületi mikrotopográfia vizsgálata**, BME GEK diplomamunka, Budapest, 2002.
- [Cz07] Czifra, Á.: **A felületi mikrotopográfia jellemzése fém-fém és fém-kerámia alkatrészek csúszósúrlódása során**, BME GEK, PhD értekezés, Budapest, 2007.
- [De99] Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers: **„Lubricants and Hydraulic Fluids”, Engineering Manual**, 1999
- [DiGeGr06] Dietzsch, M., Gerlach, M., Gröger, S.: **Back to the envelope system with morphological operations for the evaluation of surfaces**, Wear 264, p. 411–415, 2006.
- [DiPaHa98] Dietzsch, M., Papenfuss, K., Hartmann, T.: **The MOTIF-method (ISO 12085): a suitable description for functional, manufactural and metrological requirements**, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 38, Issues 5–6, p. 625–632, May-June 1998.

- [Dö99] Döbröczöni Ádám: **Gépszerkezetan I.**, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1999.
- [Dr75] Dreyhaupt, W.: **Stand der Oberflächenprüfung und – Normung in Deutschland.** Werkstatt und Betrieb, p. 523–526, 8/1975.
- [Fa82]) Fahl, C. F.: **Motif combination – a new approach to surface profile analysis,** Wear, Vol. 83, p. 165–179, 1982.
- [Ga87] Zum Gahr, K. H.: **Micrustructure and Wear of Materials,** Tribology Series, 10., Elseiver, 1987.
- [GeEnP977] Geiger, M., Engel, U., Pfestorf, M.: **New Developments for the Qualification of Technical Surfaces in Forming Processes,** Annals of CIRP 1997, p. 171–174, 1997.
- [GoKo05] Gołabczak, A., Koziarski, T.: **Assessment method of cutting ability of CBN grinding wheels,** International Journal of Machine Tools and Manufacture, In Press, Corrected Proof, 2005.
- [GuGu07] Gupta, K. K., Gupta, R.: **Despeckle and geographical feature extraction in SAR images by wavelet transform.** Photogrammetry&Remote Sensing 62 p. 473–484, 2007.
- [Gy07] Gyurecz, Gy.: **Genetikai algoritmus alkalmazhatósága a felületi hullámosság és érdekesség rekonstrukciójában,** OGÉT XV. Nemzetközi Gépész Találkozó, Kolozsvár, ISSN 1454–0746, p. 102–105, 2007.
- [HaEk71] Haracs, G., Ekszler, L.: **Sztandartizacii volnizstoszti poverhnoszti detalej masin.** Izmeritelnaja Technika, p. 29–31, 2/1971.
- [HaSaHa08] Hanada, H., Saito, T., Hasegava, M., Yanagi, K.: **Sophisticaded filtration technigue for 3D surface tophography data of rectangular area.** Wear Volume 264, Issues 5–6, p. 422–427 (2008)
- [HaSaPr04] Harsha, S. P., Sandeep, K., Prakash, R.: **Non-linear dynamic behaviors of rolling element bearings due to surface waviness.** Journal of Sound and Vibration. 272, p. 557–580, 2004.
- [JaJe04] Jang, G., Jeong S. W.: **Vibration analysis of a rotating system due to the effect of ball bearing waviness,** Journal of Sound and Vibration, Vol. 269, p. 709–726, 2004.
- [JiBl04] Jiang, X., Blunt, L.: **Third generation wavelet for the extraction of morphological features from micro and nano scalar surfaces.** Wear Volume 257, p. 1235–1240 (2004)
- [JiBlSt01] Jiang, X. Q., Blunt, L., Stout, K. J.: **Lifting wavelet for three-dimensional surface analysis.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, p. 2163–22169, 2001.
- [JoBuLa02] Josso, B., Burton, D., Lalor, M.: **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and charactersation.** Wear 252, Issues 5–6, p. 491–500, 2002.
- [KiKi07] Kim, B., Kim, W. S.: **Wavelet uniformity of plasma-processed surface roughness,** Vacuum 81 p. 649–655, 2007.
- [Ko07] Szendrő, P. (Szerk.): **Gépelemek,** Kozma, M.: 5.1. **Tribológia,** Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2007.

- [Ko94] Kozma Mihály: **Tribológia**, Műegyetem Kiadó, Budapest, 1994.
- [KoPa99] Kovács, K., Palásti, K. B.: **Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel, I. A háromdimenziós topográfiai paraméterek áttekintése**, Gépgyártástechnológia 1999/9, p. 31–38, 1999.
- [KoVáPa00] Kovács, K., Váradi, K., Palásti K. B.: **Microtopographic Analysis of Technical Surfaces by 3D Parameters**, Gépészet 2000, Second Conference on Mechanical Engineering, Budapest, Vol. 1, p. 235–240, 25–26 May 2000.
- [KoWi00] Kovács, K., Wieszl, Cs.: **Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel, II. Vizuális jellemzési technikák**, Gépgyártástechnológia 2000/3, p. 29–32, 2000.
- [Kr00] Krystek, M.: **Discrete linear profile filters**. Tagungsband X. Internatioional Colloquium on Surfaces. Chemnitz, 31. p. 145–152, Januar–2.Februar 2000.
- [Kr05] Krystek, M.: **Spline Filters for Surface Texture Analysis**, Key Engineering Materials, Volumes 295–296, p. 441–446, 2005.
- [Kr96–1] Krystek, M.: **A fast Gauss filtering algorithm for roughness measurements**, Precision Engineering, Vol. 19, p. 198–200, 1996.
- [Kr96–2] Krystek, M.: **Formfilterung durch Splines**, Tagungsband IX. Int. Oberflächenkolloquium, Chemnitz, p. 67–78, 1996.
- [KuSh06] Kumar, J., Shunmugam, M.S.: **A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations**. International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 46, Issues 3–4, p. 260–270, 2006.
- [LeBe05] León, F. P., Beyerer, J.: **Oberflächencharakterisierung durch morphologische Filterung**, Technisches Messen 72, p. 663–670, 2005.
- [LiHuHo05] Lin, S. C., Huang, H. C., Hocheng, H.: **Effects of slurry components on the surface characteristics when chemical mechanical polishing NiP/Al substrate**, Thin Solid Films, In Press, Corrected Proof, 2005.
- [LiSh06] Lingadurai, K., Shunmugam, M. S.: **Metrological characteristics of wavelet filter used for engineering surfaces**. Measurement Volume 39, Issue 7, p. 575–584, 2006.
- [LoLuCh02] Lonardo, P. M., Lucca, D. A., De Chiffre, L.: **Emerging trends in surface metrology**, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 51. Jg., Nr. 2, p. 701–723, 2002.
- [LuIo03] Lugt, P., Ioannides, E.: **Megtervezett csapágyfelület az optimális csapágykarakterisztika érdekében**, Evolution 2003/3. p. 21–24, 2003.
- [LyRaEb00] Lynagh, N., Rahnejat, H., Ebrahimi, M., Aini R.: **Bearing induced vibration in precision high speed routing spindles**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, p. 561–577, 2000.
- [Ma07] Malburg, M. C.: **Why Dimensional Measurements don't Agree**, Presentation, Manufacturing and Measurement conference and Workshop, Clearwater Beach, Florida, April 25. 2007.
- [Ma80] Majdán, I.: **Gépalkatrészek felületminősége**, Szabványkiadó, Budapest, 1980.
- [MeZa04] Mezghani, S., Zahouania, H.: **Characterisation of the 3D waviness and roughness motif**, Wear 257, Issue 12, p. 1250–1256, 2004.

- [MuWiJa05] Muhs, D., Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J.: **Roloff/Matek Maschinenelemente, 17. Auflage**, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [Né01] Néder, Z.: **A felületi érdesség hatása szerkezeti elemek érintkezési, feszültségi és hőtani állapotára száraz súrlódás esetén**, PhD értekezés, BME GEK, Budapest, 2001.
- [Ni81] Niemann, G.: **Maschinenelemente Band I**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1981.
- [NiNaQu05] Niola, V., Nasti, G., Quaremba, G.: **A problem of emphasizing features of a surface roughness by means the Discrete Wavelet Transform**, Journal of Materials Processing Technology, 164–165 p. 1410–1415, 2005.
- [Pa77] Palásti, K. B.: **A felületi érdesség meghatározásakor használatos két vonatkoztatási rendszer összehasonlítása és gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata**, Egyetemi doktori értekezés, BME, Budapest, 1977.
- [Pa83] Palásti, K. B.: **Forgácsolással megmunkált felületek mikrogeometriájának értékelése**, Kandidátusi értekezés, Budapest, 1983.
- [PaCzKo02] Palásti, K. B., Czifra, Á., Kovács, K.: **Microtopography of machined surfaces, tribological aspects of surface and operation**, DMC 2002 The 4th International Scientific Conference Development of Metal Cutting, Kassa, p. 50–57, 22–23. May 2002.
- [PaKo98] Palásti, K. B. Kovács K.: **A felületi topográfia kialakulására és változására ható tényezők a tribológia tükrében**. Gépgyártástechnológia, 1998/4. p. 15–17, 1998.
- [PaKoPá01] Palásti, K. B. Kovács K., Pálinkás T., Váradi K.: **A TopSurf, PC-vel vezérelt 3D-s érdességmérő műszer**, Műszerügyi és Méréstechnikai Közlemények 68. szám, p. 43–56, MTA-MMSZ Kft., 2001.
- [PaVáBe03] Palásti K., B.; Váradi, K.; Bercsey, T.; Néder, Z.; Czifra, Á.: **Surface microtopography in the wear process**, 9'th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Halmstad, Sweden, p. 222 – 231, 10–12 September 2003.
- [Pe02] Persson, BNJ., Bucher, F., Chiaia, B.: **Elastic contact between randomly rough surfaces: Comparison of theory with numerical results**, PhysRevB 2002; 65(184106), p.1–7, 2002.
- [PfEnGe98] Pfestorf, M., Engel, U., Geiger, M.: **Three-dimensional characterization of surfaces for sheet metal forming**, Wear, Vol. 216, p. 244–250, 1998.
- [Po94] Pozsgai Imre: **A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai**, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1994.
- [Ra98] Rasheed, H. E.: **Effect of surface waviness on the hydrodynamic lubrication of a plain cylindrical sliding element bearing**, Wear, Vol. 223, Iss. 1–2, p. 1–6, 1998.
- [RaBo98] Raghuvver Rao and A. S. Bopardikar: **Wavelet transform: introduction to theory and applications**, Addison-Wesley, India , 1998.
- [RaMuFu02] Raja, J., Muralikrishnan, B., Fu, S.: **Recent advances in separation of roughness, waviness and form**, Precision Engineering, Vol. 26, Iss. 2, p. 222–235, 2002.

- [RaRa79] Raja, J., V., Radhakrishnan, V.: **Filtering of surface profiles using fast Fourier transform**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 19 p. 133–141, 1979.
- [Sa89] Manfred Sander: **Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker**, Feinprüfung GmbH, Göttingen, 1989.
- [Sc00] Scott, P. J.: **Scale-space techniques**. Proceedings of the Xth International Colloquium on Surfaces. Chemnitz University of Technology, p. 156–161, 2000.
- [Sc73] Schrapp, A.: **Oberflächen–Kennzeichnung und Prüfung**. DIN-Mitteilungen, 5/1973. p. 185–190, 1973.
- [Sc98] Scott, P. J.: **Foundations of topological characterization of surface texture**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, Iss. 5–6, p. 559–566, 1998.
- [Se05] Seewig, J.: **Linear and robust gaussian regression filters**, Journal of Physics: Conference Series 13, p. 254–257, 2005.
- [SeBjAn02] Sellgren, Björklund, Andersson: **An FE based modell of normal contact between rough surface**, International Tribological Conferenc, Stockholm, 2002.
- [Sh87] Shunmugam, S. M.: **Comparison of motif combination with mean line and envelope systems used for surface profile analysis**, Wear, Vol. 117, n3, p. 335–345, 1987.
- [ShFoPa05] Shipway, P.H., Fowler, G, Pashby, I.R.: **Characteristics of the surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets**, Wear, Vol. 258, Iss. 1–4, p. 123–132, 2005.
- [SoSaSa05] Souza, A. M., Sales, W. F., Santos, S. C., Machado, A. R.: **Performance of single Si₃N₄ and mixed Si₃N₄+PCBN wiper cutting tools applied to high speed face milling of cast iron**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, Iss. 3, p. 335–344, 2005.
- [Sp96] Spedding, T. A.: **Animation of the evolution of surface finish with wear**, Tribology International Vol. 29. No. 3, p. 241–249, 1996.
- [St98] Staeves, J.: **Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung**, Shaker Verlag, Darmstadt, ISBN 978–3–8265–4379–1, 1998.
- [StSa05] Sarykov, O., Sakurai, K.: **Determination of interface roughness of Gd films deposited on Si surface using improved wavelet transform of X-ray reflectivity data**. Applied Surface Science 244, p. 235–239, 2005.
- [StSuDo93] Stout, K. J., Sullivan, P. J., Dong, W. P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., Zahouni, H.: **The development of methods for characterisation of roughness in three dimensions**, Comission of the European Communities EUR 15178 EN, ISBN 0 7044 1313 2, 1993.
- [StSuDo93] 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.
- [StBl00] Stout, Blunt: **Three-Dimensional Surface Topography**, Penton Press, London, 2000
- [Th98] Thomas, T. R.: **Rough Surface**, Imperial Collage Press, London, 1998.

- [ThRoAm99] [Thomas, T. R., Rosén, B.-G, Amini, N.: **Fractal characterisation of the anisotropy of rough surfaces**, Wear 232, p. 41–50, 1999.
- [TrHe98] Trumpold, H., Heldt, E.: **Why filtering surface profiles?**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, Is. 5–6, p. 639–646, 1998.
- [TrMoCo05] Trifa, F. I., Montavon, G., Coddet, C., Nardin, P., Abrudeanu, M.: **Geometrical features of plasma-sprayed deposits and their characterization methods**, Materials Characterization, Vol. 54, Iss. 2, p. 157–175, 2005.
- [Vö61] Vörös Imre: **Gépelemek**, Tankönyvkiadó, Budapest, 1961.
- [We05] Werghi, N.: **A discriminative 3D Wavelet-based descriptors: Application to the recogniton of human body postores**. Pattern recognition Letters 26, p. 663–677, 2005.
- [Wh04] Whitehouse, D.J.: **Surface Characterization and Roughness Measurement in Engineering**, Springer Berlin/Hedelberg, 2004.
- [Wh94] Whitehouse, D.J.: **Handbook of surface metrology**, Inside of Phisics Publ., Bristol, 1994.
- [Wi04] Widder, E.: **Gaskets: Surface Finish Effects in Static Sealing**, ASME B46 Seminar, Presentation, 15 April 2004.
- [WiMa98] Wie, Y. S., Malik, M. R.: **Effect of surface waviness on boundary-layer transition in two-dimensional flow**, Computers & Fluids, Vol. 27, Iss. 2, p. 157–181, 1998.
- [XuPiSo05] Xu, j. B., Piao W. Y., Song, J. F., Vorburger, T.: **A fast Gaussian Filtering Algorithm for Roughness Measurements**, Acta Metrological Sinic A26(4) p. 309–312, 2005.
- [YaHaEn01] Yanagi, K., Hara, S., Endoh, T.: **Summit identification of anisotropic surface texture and directionality assessment based on asperity tip geometry**, International Journal of Machine Tools and manufacture 41, p. 1863–1871, 2001.
- [YuPiXu] Yuan, Y. B., Piao, W. Y., Xu, J. B.: **A fast Gaussian filtering algorithm for three-dimensional surface roughness measurements**, Journal of Physics. Conference Series 48, p.1406–1461, 2006.
- [YuQiSo00] Yuan, Y. B., Qiang, X. F., Song, J. F., Vorburger, T.V.: **A fast algorithm for determining the Gaussian filtered mean line in surface metrology**, Precision Engineering, Vol. 24, p. 62–69, 2000.
- [ZaAsVa01] Zahouani, H., Assoul, M., Vargiolu, R., Mathia, T.: **The morphological tree transform of surface motifs**, Incidence in tribology, International Journal of Machine Tools and Manufacture 41, p. 1961–1979, 2001.
- [wMa96] Masad, A. J.: **Effect of Surface waviness on Transition in Three-Dimensional Boundary-Layer Flow**, Contract Nas1–96014, 1996.
http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970010470_1997013220.pdf
- [wMa07] **Neue VDA-norm zur dominanten Welligkeit**, Mahr Akademie, Göttingen, 2007.
www.mahr.com
- [wSy05] National Institute of Standards and Technology
<http://syseng.nist.gov/VSC/jsp/index.jsp> 2005.

- [wSo05] <http://161.112.232.32/softgauges>
- [wVo04] Vorburger, T.: B46.1–2002 Overview, Presentation, ASME Spring Seminar 2004-Surface Metrology, Southfield, MI, April 15, 2004
<http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/CommitteeFiles/20001.pdf>
- [wPr] <http://www.predev.com>
Precision Devices, Inc. (USA) honlapja

Hivatkozott szabványok

- ASME B46.1–2002 Surface texture (surface roughness, waviness, and lay)
- DIN 4760 Gestaltabweichungen
- DIN 4774 Messung der Wellentiefe mit elektrischen Tastschnittgeräten
- DIN 4776* Measurement of surface roughness-parameters R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} for describing the material portion in the roughness profile
- EN ISO 1302 Geometrical Product Specification (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation (ISO 1302:2002)
- EN ISO 4287 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997)
- EN ISO 4288 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture (ISO 4288:1996)
- EN ISO 8785 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface imperfections – Terms, definitions and parameters (ISO 8785:1998)
- EN ISO 11562 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters
- EN ISO 12085 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Motif parameters
- EN ISO 13565–1 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method; - Surfaces having stratified functional properties – Part 1: Filtering and general measurement conditions
- EN ISO 3274 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- EUR 15178 EN The development of methods for characterisation of roughness in three dimensions
- GE40–087G. Guide etats de surface, PSA Peugeot-Citroen
- ISO/DIS 25178–2 Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2. Terms, definitions and surface texture parameters
- ISO/TS 16610–20 Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 2: Linear profile filters: Basic concepts
- ISO/TS 16610–29 Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 29: Linear profile filters: Spline wavelets

ISO/TS 16610–41	Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters
MSZ 9655–81*	Hullámossági jellemzők fogalommeghatározásai és számértékei
MSZ 9656–88*	Felületek mikrogeometriai vizsgálatának módszerei
NFE 05–015*	États de surface des produits – Prescriptions-Première partie: Généralités – Terminologie – Définitions
VDA 2006	Oberflächenbeschaffenheit Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
VDA 2007	Oberflächenbeschaffenheit Definitionen und Kenngrößen der dominanten Welligkeit

* a jelölt szabványok nem hatályosak

A témában készült saját publikációk

- [PaHo92] Palásti, K. B., Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata IV. rész. A kiértékelés számítógépes módszerei**, Gép 1992/8, p. 45–48, 1992.
- [CzHo07] Czifra Á., Horváth S.: **Asperity analysis of worn surfaces**, ECOTRIB 2007, European Conference on Tribology Szlovénia, p. 307–315, 2007.
- [CzHoPá07] Czifra, Á., Horváth, S., Pál, A.: **A mikrotopográfia változása száraz súrlódás esetén**, Gép, 2007/10–11 ISSN 0016–8572, p.28–31, 2007.
- [CzVaHo08] Czifra, Á., Váradi, K., Horváth, S.: **Three dimensional asperity analysis of worn surfaces**, Meccanica Journal, Online, ISSN 1572–9648, 2008.
- [FaCzPaHo05] Farkas, G., Czifra, Á., Palásti, K. B., Horváth, S.: **Műszaki felületek mikrogeometriai vizsgálatában alkalmazott 2D-s és 3D-s paraméterek összevetése, információtartalmuk elemzése**, Gép, 2005/2–3, p. 51–59, 2005.
- [FaHo05] Farkas, G., Horváth, S.: **Műszaki felületek mikrotopográfiai vizsgálata**, Fiala Műszaki Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, ISBN 973–8231–442, p. 251–254, 2005.
- [FeCzHo07] Fekete, G., Czifra, Á., Horváth, S.: **„Ellentmondásos” eredmények mikrotopográfiai vizsgálatok esetén**, Műszaki szemle Technical review, 38. szám, ISSN 1454–0746, p. 102–105, 2007.
- [FeHoCz07] Fekete, G., Horváth, S., Czifra Á.: **Microgeometry tests of “contradictory” surfaces with various evaluation techniques**, Acta Polytechnica Hungarica Vol. 4, No. 2, p. 87–97, 2007.
- [Ho05] Horváth, S.: **A felületi hullámosság jelentősége, a hullámosság 3D-s értelmezése**, Gép, 2005/9–10, p. 82–85, 2005.
- [Ho08] Horváth, S.: **A felületvizsgálat korszerű szűrési módszerei**, Műszaki szemle Technical review, Különszám, ISSN 1454–0746, p. 173–179, 2008.
- [Ho89] Horváth, S.: **Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata**, BDGMF Jubileumi Tudományos Ülésszak – Bp. 1989. X. 10. III. kötet, p.76–79, 1989.
- [Ho90] Horváth, S.: **Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata**, BME Gépészmérnöki Kar, Egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1990.

- [Ho92] Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata II. rész: A felületi hullámosság**, Gép, 1992/6, p. 9–13, 1992.
- [HoCz05] Horváth, S., Czifra, Á.: **The importance of waviness in study of microtopography of cutting surface**, DMC 2005 The 5th International Scientific Conference, Development of Metal Cutting, Kassa, p. H 1–4, 12–13 September 2005.
- [HoCz06–1] Horváth, S., Czifra, Á.: **Műszaki felületek tervezése, a felületi hullámosság jelentősége**, OGÉT XIV. Nemzetközi Gépész Találkozó, Marosvásárhely, ISBN 973–7840–10–0, p. 170–174, 2006.
- [HoCz06–2] Horváth, S., Czifra, Á.: **The importance of surface waviness; Problems with 3-D measuring and evaluation techniques**, „Gépészet 2006” Proceedings of Fifth Conference of Mechanical Engineering, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar és Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár, ISBN 963 593 465 3, CD, 2006.
- [HoCz06–3] Horváth, S., Czifra, Á.: **A felülettervezés jelentősége és problémái a MH technikai eszközeinek gyártása és felújítása során, különös tekintettel a felületi hullámosságra**, Gép, 2006/5, p.18–23, 2006.
- [HoCz08] Horváth, S., Czifra, Á.: **Effect of surface waviness in sliding behavior of engineering surfaces**, „Gépészet 2008” Proceedings of Sixth Conference of Mechanical Engineering, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar és Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár (*elfogadott publikáció*)
- [HoGy08] Horváth, S., Gyurecz, Gy.: **Műszaki felületek hullámosságának modellezése**, Műszaki szemle Technical review, Különszám, ISSN 1454–0746, p. 165–168, 2008.
- [HoKo03] Horváth, S., Kósáné, Cs.: **Műszaki kommunikáció, 6.1. A valóságos felületek minősége, 6.2. A felületi érdesség és hullámosság megadása műszaki rajzokon**, p.:145–156, BMF-BGK 3014 jegyzet, Budapest, 2003.
- [HoPa91] Horváth, S., Palásti, K. B.: **Új módszer gépalkatrészek felületi mikrogeometriájának jellemzésére**, Géptervezők VIII. Országos Szemináriuma, Miskolc, p. 101–105, 1991.
- [HoPa92] Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7, p. 36–41, 1992.
- [HoPa93–1] Horváth, S., Palásti, K. B.: **Forschungsergebnisse der Oberflächengeometrie in Ungarn**, 4. Internationales DAAAM Symposium, Brno, p. 119–120, 1993.
- [HoPa93–2] Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi hullámosság, mint a gépalkatrészek minőségének egyik összetevője**, Gép, 1993/10–11, p. 21–22, 1993.
- [PaCzHo07] Palásti, K. B. Czifra, Á., Horváth, S.: **A kopás és a 3D-s felületi érdesség (mikrotopográfia) összefüggései**, Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek, 2007/2. ISSN: 1587–6853, p. 73–77, 2007.
- [PaHo91–1] Palásti K., B., Horváth, S.: **Érdességmérő szolgáltatásaink kiterjesztése számítógéppel**, MicroCAD Konferencia, Miskolc, p. 64–69, 1991.

- [PaHo91–2] Palásti, K. B., Horváth, S.: **Felületi mikrogeometria, érdesség, hullámosság jellemző paramétereit**, Segédlet, BDGMF 1991.
- [PaHoKo99] Palásti KB; **Horváth S**; Kovács P: Műszaki felületek értékelésének fejlesztése a Bánki Donát Műszaki Főiskolán, Jubileumi Tud. Ülésszak, Budapest, 1999/9, p. 333–338, 1999.

A témához kapcsolódó poszterkiállítások

- [1] Palásti KB; Horváth S: **Felületi mikrogeometriát értékelő számítógépes rendszer**, Európa Szeminárium 91. Budapest, 1991
- [2] BMF-BGK (Horváth S); BME-GSZI: **Forgácsolt felületek mikrotopográfiája, a felület és a működés kapcsolata**, Machtech 7. Nemzetközi gépgyártás-technológiai és hegesztés-technikai szakkonferencia, Budapest, 2005.
- [3] Czifra Á; Horváth S: **Asperity analysis of worn surfaces**, ECOTRIB 2007, European Conference on Tribology Ljubjana, Szlovénia, 2007.

Saját publikációra való külső hivatkozások

- [1] Beno J, Bereczková A: Systém motífu pre povrch pri obrábani kalených oceľí, The 4th International Scientific Conference, Kassa 2002. május 22–23. p. 297–301
Horváth S; Palásti K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7. p. 36–41
- [2] Gyurec, Gy.: felületi mikrogeometria optimális rekonstrukciója genetikai algoritmus alkalmazásával, Gép, 2005/9–10, p. 67–70
Horváth, S.: **Felületek hullámosságának vizsgálata**, Egyetemi doktori értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 1990.
- [3] Kovács, K., Palásti, K. B.: Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel, Gépgyártástechnológia, 1999/8 p. 19–24
Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata II. rész: A felületi hullámosság**, Gép, 1992/6 p. 9–13
- [4] Néder, Z.: A felületi érdesség hatása szerkezeti elemek érintkezési, feszültségi és hőtani állapotára száraz súrlódás esetén, PhD értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 1999.
Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata II. rész: A felületi hullámosság**, Gép, 1992/6 p. 9–13
- [5] Néder, Z.: A felületi érdesség hatása szerkezeti elemek érintkezési, feszültségi és hőtani állapotára száraz súrlódás esetén, PhD értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 1999.
Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7. p. 36–41
- [6] Néder, Z.: A felületi érdesség hatása szerkezeti elemek érintkezési, feszültségi és hőtani állapotára száraz súrlódás esetén, PhD értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 1999.
Palásti, K. B., Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata IV. rész. A kiértékelés számítógépes módszerei**, Gép 1992/8. p. 45–48
- [7] Wiezl, Cs.: Megmunkált felületek 3D-s paramétereit, Diplomamunka, ELTE TTK, 1999.
Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata II. rész: A felületi hullámosság**, Gép, 1992/6 p. 9–13

- [8] Wiezl, Cs.: Megmunkált felületek 3D-s paraméterei, Diplomamunka, ELTE TTK, 1999. Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7. p. 36–41
- [9] Wiezl, Cs.: Megmunkált felületek 3D-s paraméterei, Diplomamunka, ELTE TTK, 1999. Palásti, K. B., Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata IV. rész. A kiértékelés számítógépes módszerei**, Gép 1992/8. p. 45–48
- [10] Palásti, K. B. Kovács K., Pálinkás T., Váradi K.: **A TopSurf, PC-vel vezérelt 3D-s érdességmérő műszer**, Műszerügyi és Méréstechnikai Közlemények 68. szám, p. 43–56. MTA-MMSZ Kft., 2001.
Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7, p. 36–41
- [11] Palásti, K. B., Kovács K., Pálinkás T., Váradi K.: **A TopSurf, PC-vel vezérelt 3D-s érdességmérő műszer**, Műszerügyi és Méréstechnikai Közlemények 68. szám, p. 43–56. MTA-MMSZ Kft., 2001.
Horváth, S., Palásti, K. B.: **Forschungsergebnisse der Oberflächengeometrie in Ungarn**, 4. Internationales DAAAM Symposium, Brno, 1993, p. 119–120
- [12] Gyurecz, Gy.: Genetikai algoritmus (GA) alkalmazhatósága a felületi hullámosság és érdesség rekonstrukciójában, Műszaki szemle Technical review, 38. szám, 2007. ISSN 1454–0746, p. 102–105
Horváth, S., Czifra, Á.: **Műszaki felületek tervezése, a felületi hullámosság jelentősége**, OGÉT XIV. Nemzetközi Gépész Találkozó 2006 Marosvásárhely, ISBN 973–7840–10–0, p. 170–174
- [13] Fekete, G., Czifra, Á.: Influence of filtering in surface roughness characterisation, ECOTRIB 2007, European Conference on Tribology Szlovénia p. 299–306
S. Horváth, Á. Czifra: **The importance of waviness in study of microtopography of cutting surface**, DMC 2005, The 5th International Scientific Conference, Development of Metal Cutting, Kassa, 12–13 September 2005. p.:H 1–4
- [14] Balogh, T.: Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egy., 2007.
Palásti, K. B., Horváth, S., Kovács, P.: **Műszaki felületek értékelésének fejlesztése a Bánki Donát Műszaki Főiskolán**, Jubileumi Tud. Ülésszak, Budapest, 1999/9. p. 333–338

A témához kapcsolódó kutatási jelentések

- [1] **Felületérdesség vizsgáló műszerekhez átfogó mikrogeometriai jellemzést biztosító számítógépes kiértékelő kapcsolat fejlesztése**, G/6–10.130 Kutatási jelentés I. (1988)., II. (1989)., III. (1990).Témavezető: Palásti Kovács Béla, Horváth S résztvevő
- [2] OTKA T 026117,1998–2001, Tematikus pályázat: **”A felületi topográfia 3D-s vizsgálatának, kiértékelési technikáinak kidolgozása a megmunkálás során kialakuló felületek, illetve az egymással kapcsolódó felületpárok tribológiai kölcsönhatásának elemzésére”** Témavezető: Palásti Kovács Béla, Horváth S résztvevő
- [3] OTKA T 043151, 2003–2006, Tematikus pályázat **”Kapcsolódó felületpárok mikrotopográfiájának statisztikai feldolgozása és kölcsönhatásuk elemzése különböző kopási folyamatokban”** Témavezető: Palásti Kovács Béla, Horváth S résztvevő

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A	mm	motif határérték A	motif limit value A
A _e	mm ²	értékelési terület	evaluation area
AR	μm,mm	érességi motif hossz	roughness motif length
AW	μm,mm	hullámossági motif hossz	waviness motif length
AW	mm	hullámossági motífovok közepes osztása	mean spacing of waviness motifs
B	mm	motif határérték B	motif limit value B
H	μm	érességi motif mélység	roughness motif depth
h _o	μm	minimális kenőfilmvastagság	
Hw	μm	hullámossági motif mélység	waviness motif depth
ln	μm	értékelési hossz	evaluation length
lp	μm	értékelési szakasz P profil	sampling length P profil
lp	μm	ráfutási szakasz	pre travel, run-up
lp	μm	lefutási szakasz	post travel, run-down
lr	μm	értékelési szakasz R profil	sampling length R profil
lt	μm	mérési hossz	tracing length
lw	μm	értékelési szakasz W profil	sampling length W profil
P		P profil	primary profile
P _t	μm	teljes profilmélység P profil	total height of primary profile
R		érességi profil	roughness profile
R _a , Ra	μm	átlagos éresség	arithmetic mean deviation of the roughness profile
r _{ti} , r _{tr}	μm	(tapintótű)csúcssugár	tip radius
R _t	μm	teljes profilmélység R profil	total height of roughness profile
R _z , Rz	μm	egyenetlenség magasság	maximum height of roughness profile
S10z	μm	tízpontmagasság	10 point height
S5p	μm	ötponc csúcmagasság	5 point peak height
S5v	μm	ötponc völgymélység	5 point valley height
Sa	μm	átlagos egyenetlenség	arithmetical mean height
Sal	μm	autokorrelációs hossz	auto-correlation length
Sda(c)	μm ²	zárt völgyterület	closed dales area
Sdc(mr)	μm	inverz hordfelület arány	inverse areal material ratio of the scale limited surface
Sdq		közepes hajlás (dőlés)	root mean square gradient of the scale limited surface
Sdr		felületarány	developed interfacial area ratio of the scale limited surface
Sdv(c)	μm ³	zárt völgytérfogat	closed dales volume
Sha(c)	μm ²	zárt hegyterület	closed hills area
Shv(c)	μm ³	zárt hegytérfogat	closed hills volume
Sk	μm	magzóna magassága	core surface depth
Sku		lapultsági mérőszám	kurtosis of the scale limited surface
Smq	μm	Smq paraméter	Smq parameter
Smr(c)	%	hordfelület arány	areal material ratio of the scale limited surface
SMr1	%	anyaghányad 1	material portion 1
SMr2	%	anyaghányad 2	material portion 2
Sp	μm	maximális csúcmagasság	maximum peak height
Spc	1/mm	átlagos csúcsgörbület	arithmetic mean peak curvature
Spd	1/mm ²	csúcssűrűség	density of peaks
Spk	μm	Spk paraméter	Spk parameter

Spq	μm	Spq paraméter	Spq parameter
Sq	μm	az eltérések mértani átlaga	root mean square height of the scale limited surface
Ssk		ferdeségi mérőszám	skewness of the scale limited surface
Std	$^{\circ}$	felület textúra iránya	texture direction of the surface
Str		textúrahelyzet viszonyszám	texture aspect ratio of the surface
Sv	μm	maximális völgyrmélység	maximum pit height
Svk	μm	Svk paraméter	Svk parameter
Svq	μm	Svq paraméter	Svq parameter
S _w Sw	μm	közepes hullámhossz	
SWt	μm	hullámosság magasság	area waviness height
Sxp	μm	csúcsmagasság	peak extreme height
Sz	μm	maximális magasság	maximum height of scale limited surface
T	μm	motif jellemző mélysége	motif characteristic depth
Vm(mr)	ml/m^2	anyaghányad	material volume
Vmc	ml/m^2	magzóna anyagtérfogat hányada	core material volume of the scale limited surface
Vmp	ml/m^2	csúcszóna anyagtérfogat hányada	peak material volume of the scale limited surface
Vv(mr)	ml/m^2	ürestérfogat hányad	void volume
Vvc	ml/m^2	magzóna ürestérfogat hányada	core void volume of the scale limited surface
Vvv	ml/m^2	völgyzóna ürestérfogat hányada	dale void volume of the scale limited surface
W		hullámossági profil	waviness profile
W	μm	hullámossági motifok közepes magassága	mean depth of waviness motifs
W _{dc} , W _{dc}	μm	profilmagasság különbség	profile section height difference
W _a , W _a	μm	W profil közepes eltérése	arithmetic mean deviation of the waviness profile
W _c	μm	W profilelemek közepes magassága	mean height of waviness profile elements
WD		domináns hullámossági profil	dominantes Welligkeitsprofil
WDc	μm	domináns hullámosság átlagmagassága	mittlere Höhe der Profilelemente
WDSm	mm	domináns hullámhossz	horizontale Welligkeitskenngröße
WDt	μm	domináns hullámosság magasság	Gesamthöhe des Profils
Wku		W profil lapultsági mérőszáma	kurtosis of the waviness profile
W _{max}	μm	maximális hullámosság	
W _{mr}		hordozóhossz arány	relative material ratio
W _{mr} (c)	mm	hordozóhossz	material ratio of profile
W _p	μm	W profil maximális csúcsmagassága	maximum waviness profile peak height
W _q	μm	W profil közepes mértani eltérése	root mean square deviation
W _{sk}		W profil ferdeségi mérőszáma	skewness of the waviness profile
W _{sm}	mm	hullámosság közepes hullámhossza	mean width elements
W _t , W _t	μm	W profil maximális egyenetlensége	total height of waviness profile
W _t *	μm	hullámosság magasság	waviness height
W _{te}	μm	teljes hullámmélység	total depth of waviness
W _v	μm	W profil maximális völgymélysége	maximum waviness profile valley depth
W _x	μm	maximális hullámmélység	maximum depth of waviness
W _z , W _z	μm	W profil maximális magassága	maximum height of waviness profile
W Δ q, W Δ q		W profil dőlésének négyzetes középértéke	root mean square slope of the waviness profile
Z(x)	μm	profilmagasság	profile height

Z _p	μm	csúcsmagasság	profile peak height
Z _v	μm	völgymélység	profile valley depth
λ	μm,mm	hullámhossz	wavelength
λ _B	μm	határhullámhossz	λ _B profile filter cut-off
λ _c		λ _c profilszűrő	λ _c profile filter
λ _c	mm	λ _c profilszűrő cut-off	λ _c profile filter cut-off
α _{cl}	mm ²	zárt üresterület	closed void area
λ _f		λ _f profilszűrő	λ _f profile filter
λ _f	mm	λ _f profilszűrő cut-off	λ _f profile filter cut-off
α _{op}	mm ²	nyitott üresterület	open void area
λ _s		λ _s profilszűrő	λ _s profile filter
λ _s	μm	λ _s profilszűrő cut-off	λ _s profile filter cut-off
Θ _{tű}	fok	(tapintótű) kúpszög	cone angle

* ASME B46.1–2002

A Surf3D szoftver paraméter-jelölései:

sR _a	μm	R felület átlagos egyenetlensége	arithmetical mean deviation of the R surface
sR _z	μm	R felület tízpont magassága	ten point height of the R surface
sR _{Sk}		R felület ferdeségi mérőszáma	skewness of the R surface
sR _{Ku}		R felület lapultsági mérőszáma	kurtosis of the R surface
sR _{dq}	°	R felület közepes dőlése	root mean square slope of the R profile
sR _{tp}		R felület hordozófelületi arány	R surface bearing area ratio
sR _{bi}		R felület hordozófelületi jelzőszám	R surface bearing index
sR _{ci}		R felület magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma	R surface core fluid retention index
sR _{vi}		R felület völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma	R surface valley fluid retention index
sP _a	μm	P felület átlagos egyenetlensége	arithmetical mean deviation of the P surface
sP _z	μm	P felület tízpont magassága	ten point height of the P surface
sP _{Sk}		P felület ferdeségi mérőszáma	skewness of the P surface
sP _{Ku}		P felület lapultsági mérőszáma	kurtosis of the P surface
sP _{dq}	°	P felület közepes dőlése	root mean square slope of the P profile
sP _{tp}		P felület hordozófelületi arány	P surface bearing area ratio
sP _{bi}		P felület hordozófelületi jelzőszám	P surface bearing index
sP _{ci}		P felület magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma	P surface core fluid retention index
sP _{vi}		P felület völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszáma	P surface valley fluid retention index
sW _a	μm	W felület átlagos egyenetlensége	arithmetical mean deviation of the W surface
sW _z	μm	W felület tízpont magassága	ten point height of the W surface

MELLÉKLETEK

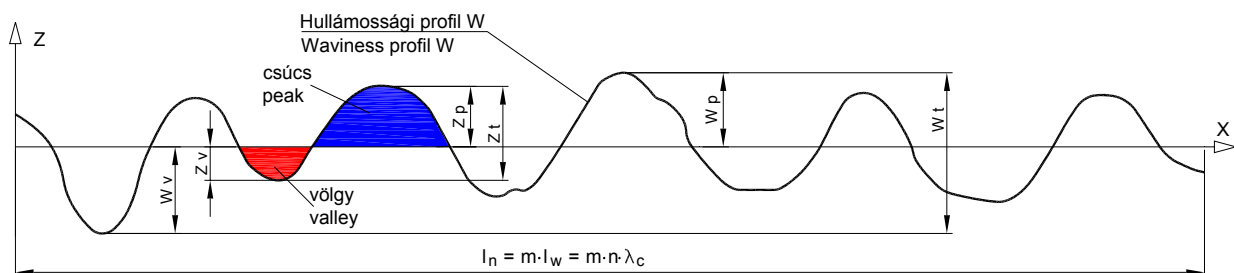
1. Melléklet: A mikrogeometria és mikrotopográfia hullámossági paramétere

1.1. 2D-s paraméterek

1.1.1 Középvonalas paraméterek (EN ISO 4287)

Az EN ISO 4287 értelmében a P, W és R profilokból hasonló módon számíthatóak a paraméterek, ebből következően a hullámosságra vonatkozóan is nagyszámú (W) paraméter került definiálásra.

A W_t , $W_{mr}(c)$, $W_{\delta c}$ és W_{mr} paramétereket az l_n értékelési hosszra, a többit pedig a az l_w hullámossági értékelési szakaszra vonatkozóan kell számítani.



Amplitudó paraméterek

Wp hullámossági profil maximális csúcsmagassága (maximum waviness profile peak height) a legnagyobb Z_p érték

Wv hullámossági profil maximális völgymélysége (maximum waviness profile valley depth) a legnagyobb Z_v érték

Wz hullámossági profil maximális magassága (maximum height of waviness profile) az értékelési szakaszon (l_w) belüli legmagasabb és legalacsonyabb pont távolsága

Wc hullámossági profilelemek közepes magassága (mean height of waviness profile elements)

$$W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i}$$

Wt hullámossági profil maximális egyenetlensége (total height of waviness profile) az értékelési hosszban (l_n) belüli legmagasabb és legalacsonyabb pont távolsága

Wa hullámossági profil közepes eltérése (arithmetic mean deviation of the waviness profile)

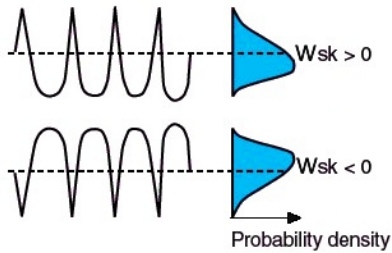
$$W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Wq hullámossági profil közepes mértani eltérése (root mean square deviation)

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

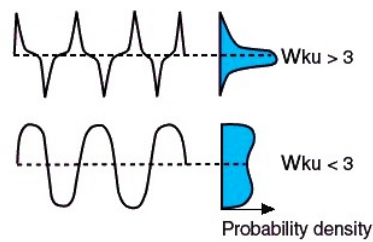
Wsk hullámossági profil ferdeségi mérőszáma (skewness of the waviness profile)

$$Wsk = \frac{1}{Wq^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right]$$



Wku hullámossági profil lapultsági mérőszáma (kurtosis of the waviness profile)

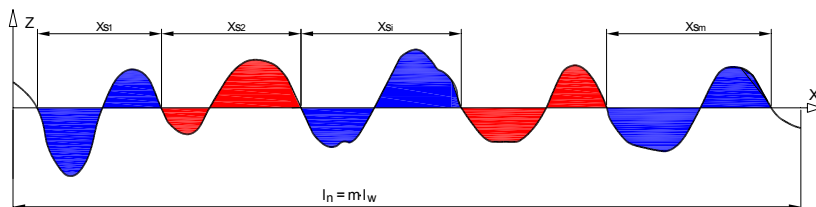
$$Wku = \frac{1}{Wq^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right]$$



Hosszirányú paraméterek

Wsm hullámosság közepes hullámhossza (mean width of the profil elements)

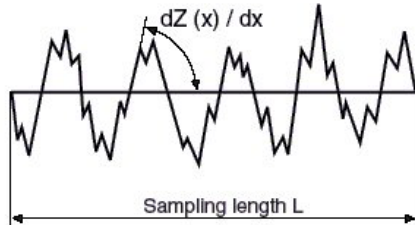
$$Wsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i$$



Hibrid paraméterek

WΔq (Wdq) hullámossági profil hajlásának négyzetes középértéke (root mean square slope)

$$W \Delta q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left[\frac{d}{dx} Z(x) \right]^2 dx}$$



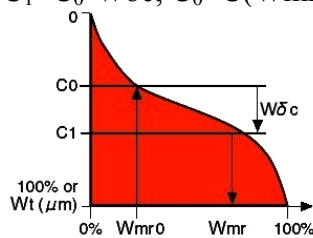
Működési tulajdonságokat jellemző paraméterek

(A hullámossági profil hordfelület görbéjéből származtatott paraméterek)

Wmr hordozóhossz arány (relative material ratio)

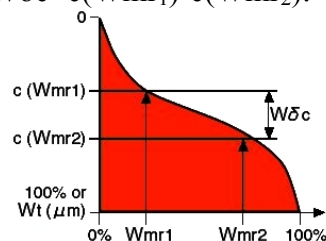
$$Wmr = Wmr(c_1)$$

$$C_1 = C_0 - W\delta c, \quad C_0 = C(Wmr_0)$$



Wδc (profile section height difference)

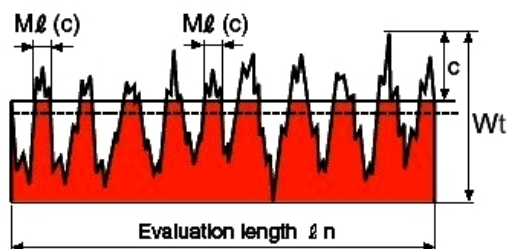
$$W\delta c = c(Wmr_1) - c(Wmr_2): \quad Wmr_1 < Wmr_2$$



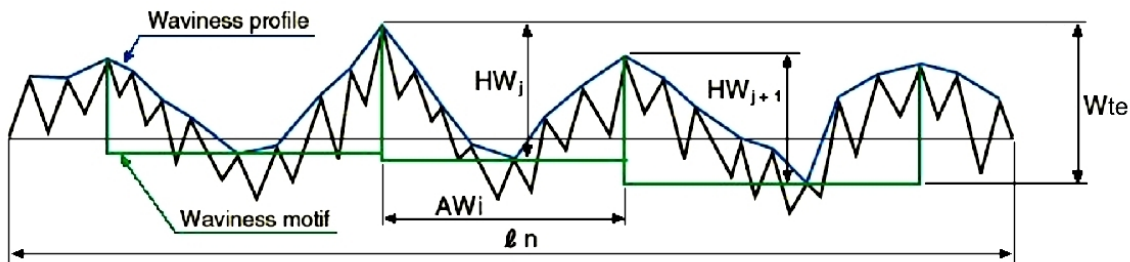
Wmr(c) hordozóhossz (material ratio of profile)

Wm(c) a profil egy c magasságában meghúzott vonal által a kiemelkedésekből kimetszett szakaszok összege.

$$Wmr(c) = \frac{100}{ln} \sum_{i=1}^m MI(c)_i (\%)$$



1.1.2. Motifparaméterek (EN ISO 12085)



AW hullámossági motifok közepes osztása (mean spacing of waviness motifs)

$$AW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AW_i$$

W hullámossági motifok közepes magassága (mean depth of waviness motifs)

$$W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m HW_j$$

Wx maximális hullámmélység (maximum depth of waviness)

$$W_x = \max HW_j$$

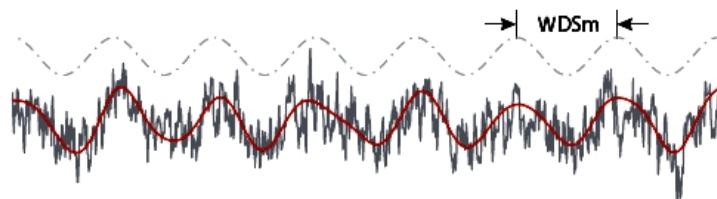
Wte teljes hullámmélység (total depth of waviness)

A hullámossági burkolóvonal legmagasabb és legalacsonyabb pontjának távolsága.

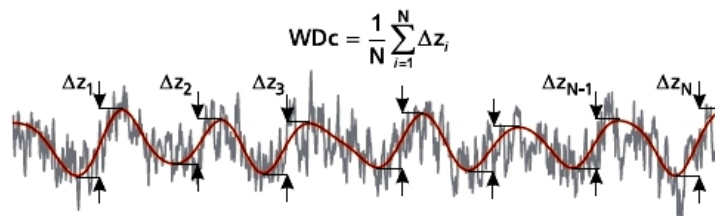
1.1.3. A domináns hullámosság (dominante Welligkeit) paraméterei (VDA 2007)

A VDA 2007-ben értelmezett domináns hullámosság 3 paraméterét a domináns hullámossági profilból (WD) az EN ISO 4287 alapján származtatják:

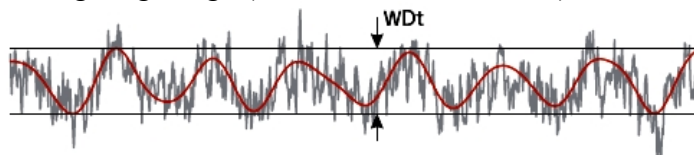
WDSm domináns hullámhossz (horizontale Welligkeitskenngröße)



WDc domináns hullámosság átlagmagassága (mittlere Höhe der Profilelemente)



WDt domináns hullámosság magassága (Gesamthöhe des Profils)



1.2. 3D-s paraméterek ISO DIS 25178–2

1.2.1. Amplitudó paraméterek

Jel	Paraméter neve	Description
Sq	eltérések mértani átlaga	root mean square height of the scale limited surface
Ssk	ferdeségi mérőszám	skewness of the scale limited surface
Sku	lapultsági mérőszám	kurtosis of the scale limited surface
Sp	maximális csúcsmagasság	maximum peak height
Sv	maximális gödörmélység	maximum pit height
Sz	maximális magasság	maximum height of scale limited surface
Sa	átlagos egyenetlenség	arithmetical mean height

Sq a középsíktól való eltérések mértani átlaga (root mean square height of the scale limited surface)

Sq a $Z(x,y)$ felületi pontoknak az illeszkedő felület körüli szórását adja meg. A négyzetre emelés következtében igen érzékenyen reagál a nagyobb felületi kiemelkedésekre illetve mélyedésekre.

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy}$$

Ssk ferdeségi mérőszám (skewness of the scale limited surface)

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x,y) dx dy \right]$$

A paraméter a felületi topográfia amplitudó sűrűségfüggvényének (ADK) alakját – a középsíkhöz (vagy magasabbrendű felületek esetén a polinomiális középfelülethez) viszonyított aszimmetriáját jellemzi. Gaussi (vagy normális eloszlású) felületeknél Ssk értéke nulla. Ssk negatív, ha a sűrűségfüggvény-görbe csúcspontja a középsík feletti oldalon („telt” jellegű profil) jelenik meg, és pozitív („üres” profil) a fordított esetben.

Sku lapultsági mérőszám (kurtosis of the scale limited surface)

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x,y) dx dy \right]$$

A topográfia magasságeloszlás-görbéjének csúcosságát, hegyességét, tehát szórását jellemzi. Utal a felület egyenetlenségére. Nagy értéke jelenti azt, hogy a felület nagy része egyenletes.

Sp maximális csúcsmagasság (maximum peak height)

Sp= a legmagasabb csúcs távolsága a középsíktól

Sv maximális gödörmélység (maximum pit height)

Sv= a legmélyebb völgy pont távolsága a középsíktól

Sz maximális magasság (maximum height of scale limited surface)

$Sz = Sp + Sv$ a legmagasabb csúcs és a legmélyebb gödör merőleges távolsága

Sa átlagos egyenetlenség (arithmetical mean height)

$$Sa = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| dx dy$$

1.2.2. Térközi paraméterek

Jel	Paraméter neve	Description
Str	textúrahelyzet viszonyszám	texture aspect ratio of the scale limited surface
Sal	autokorrelációs hossz	auto-correlation length
Std	felület textúra iránya	texture direction of the scale limited surface

Str textúrahelyzet viszonyszám (texture aspect ratio)

$$Str = \frac{\underset{MIN}{tx, ty \in R \sqrt{tx^2 + ty^2}}}{\underset{MAX}{tx, ty \in Q \sqrt{tx^2 + ty^2}}}, \text{ ahol } \begin{cases} R = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \leq 0,2\} \\ Q = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \geq 0,2\} \end{cases}$$

Sal autokorrelációs hossz (auto-correlation length)

Sal a leggyorsabb csillapodású autokorrelációs hossz, az a legrövidebb autokorrelációs hossz, amelynél az autokorrelációs függvény (ACF) 0,2-re csillapodik.

$$Sal = \underset{MIN}{tx, ty \in R \sqrt{tx^2 + ty^2}}, \text{ ahol } R = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \leq 0,2\}$$

Std felület textúra iránya (texture direction of the scale limited surface)

Stda a polár koordinátás amplitúdó sűrűség spektrum (PSD) legnagyobb értékéhez tartozó szög.

1.2.3. Hibrid paraméterek

Jel	Paraméter neve	Description
Sdq	Átlagos hajlás (dőlés)	root mean square gradient of the scale limited surface
Sdr	felületarány	developed interfacial area ratio of the scale limited surface

Sdq ($S\Delta q$) közepes hajlás/dőlés (root mean square gradient of the scale limited surface)

Sdq a felületi mikrotopográfia hajlásának (dőlésének) négyzetes középértékét adja meg a mintavételi felületen belül.

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A \int_A \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

Sdr felületarány (developed interfacial area ratio of the scale limited surface)

Az Sdr felületarány kiszámításához a mintavételi pontokra fektetett háromszöglapocskákból alkotott felületet és a mintavételi felület különbségét vonatkoztatják a mintavételi felületre.

$$Sdr = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]$$

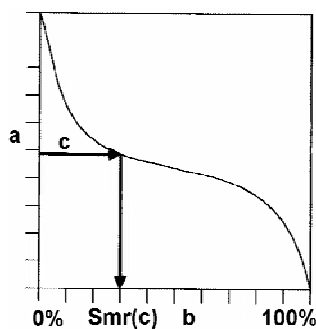
1.2.4. Funkcionális paraméterek

A funkcionális (vagy működési tulajdonságokat leíró) a paramétereket a hordfelület görbéből származtatjuk.

Jel	Paraméter neve	Description
Smr(c)	hordfelület arány	areal material ratio of the scale limited surface
Sdc(mr)	inverz hordfelület arány	inverse areal material ratio of the scale limited surface
Vv(mr)	ürestérfogat hányad	void volume
Vvv	völgyzóna ürestérfogat hányada	dale void volume of the scale limited surface
Vvc	magzóna ürestérfogat hányada	core void volume of the scale limited surface
Vm(mr)	anyaghányad	material volume
Vmp	csúcszóna anyagtérfogat hányada	peak material volume of the scale limited surface
Vmc	magzóna anyagtérfogat hányada	core material volume of the scale limited surface
Sxp	csúcsmagasság	peak extreme height

Smr(c) hordfelület arány (areal material ratio of the scale limited surface)

Smr(c) a c profilmagassághoz tartozó hordfelület arány.

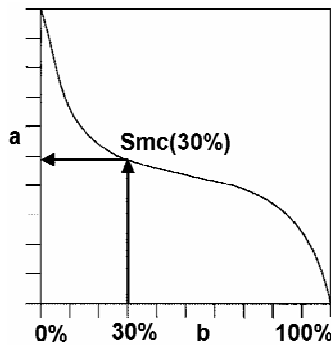


a profilmagasság
b hordfelület arány

A középsíkkal párhuzamos *c* magasságú sík (nem sík felület esetén az illeszkedő polinomiális felülettel párhuzamos felület) által kimetszett felület és a mintavételi felület aránya.

Sdc(mr) inverz hordfelület arány (inverse areal material ratio of the scale limited surface)

Sdc(mr) az mr (material ratio) hordfelület arányhoz tartozó profilmagasság.



a profilmagasság
 b hordfelület arány

V_v(mr) ürestérfogat hányad (void volume)

V_v(mr) az mr (material ratio) hordfelület arányhoz tartozó ürestérfogat.

$$V_v(mr) = \frac{K}{100\%} \int_{mr}^{100\%} [Sdc(mr) - Sdc(q)] dq, \text{ ahol } K \text{ a ml/m}^2 \text{ mértékegység konverziója.}$$

V_{vv} völgyzóna ürestérfogat hányada (dale void volume of the scale limited surface)

V_{vv} a 80% hordfelület arányhoz tartozó ürestérfogat

$$V_{vv} = V_v(80\%)$$

V_{vc} magzóna ürestérfogat hányada core void volume of the scale limited surface

V_{vc} a magzóna (10% és 80% hordfelület arány közti zóna) ürestérfogat hányada

$$V_{vc} = V_v(10\%) - V_v(80\%)$$

A felület kopási folyamatának előrehaladtával értéke csökken, amely egyben a felület nőőanyagmegtartási képességének csökkenését is jelenti.

V_m(mr) anyaghányad (material volume)

V_m(mr) anyaghányad az mr (material ratio) hordfelület arányhoz tartozó anyaghányad.

$$V_m(mr) = \frac{K}{100\%} \int_0^{mr} [Sdc(q) - Sdc(mr)] dq, \text{ ahol } K \text{ a ml/m}^2 \text{ mértékegység konverziója.}$$

V_{mp} csúcszóna anyagtérfogat hányada (peak material volume of the scale limited surface)

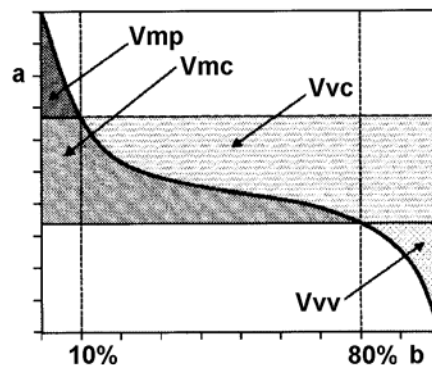
V_{mp} a 10% hordfelület arányhoz tartozó anyaghányad.

$$V_{mp} = V_m(10\%)$$

V_{mc} magzóna anyagtérfogat hányada (core material volume of the scale limited surface)

V_{mc} a magzóna (10% és 80% hordfelület arány közti zóna) anyagtérfogat hányada

$$V_{mc} = V_m(80\%) - V_m(10\%)$$

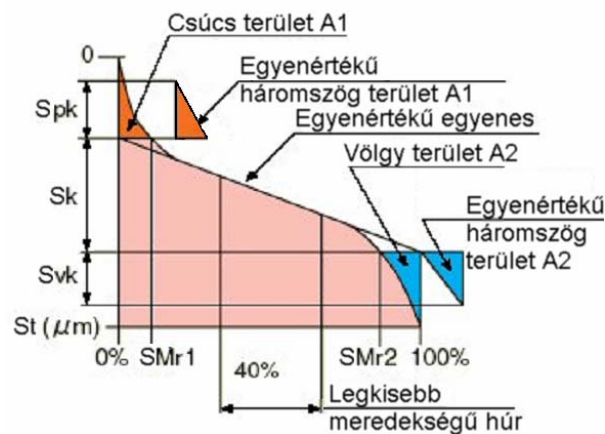
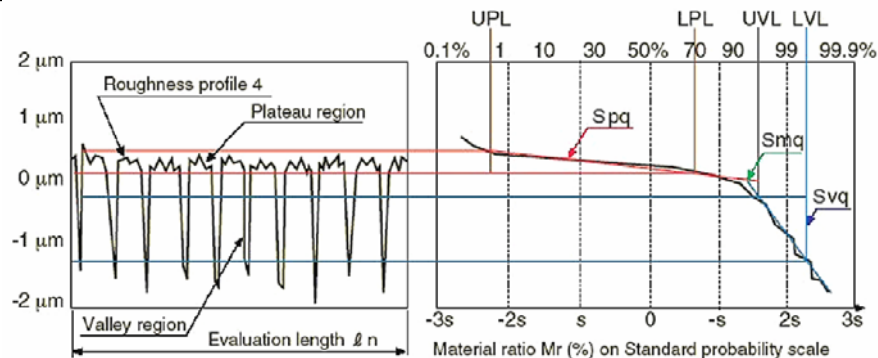


Sxp csúcsmagasság (peak extreme height)

Sxp az 50% és 97,5% hordozófelületi arányhoz tartozó profilmagasságok különbsége.

Az ISO 13565–2,–3 szabványok 3D-s értelmezésével képzett funkcionális paraméterek

Jel	Paraméter neve	Description
Sk	magzóna magassága	core surface depth
Spk	Spk paraméter	Spk parameter
Svk	Svk paraméter	Svk parameter
SMr1	anyaghányad 1	material portion 1
SMr2	anyaghányad 2	material portion 2
Svq	Svq paraméter	Svq parameter
Spq	Spq paraméter	Spq parameter
Smq	Smq paraméter	Smq parameter

Sk, Spk, Svk, SMr1, SMr2 paraméterek értelmezése:**Svq, Spq, Smq** paraméterek értelmezése:

1.3. A Surf3D szoftver 3D-s paraméterei

A mikrotopográfia kiértékelése során használt Surf3D szoftver paramétereinek nagy részét az ISO szabványtervezet tartalmazza, de a szoftver a paraméterek jelölésében a műszergyártók többségének eddigi gyakorlatát követi, és a topográfiai paraméterekre a felület jellegétől függő jelölést használ:

P felület: sP
W felület: sW
R felület: sR

Az Surf 3D és az ISO DIS 25178–2 jelölései közti megfelelést az alábbi táblázat foglalja össze:

Surf3D	ISO DIS 25178–2
sP _a , sW _a , sR _a	Sa
sP _{Sk} , sW _{Sk} , sR _{Sk}	Ssk
sP _{Ku} , sW _{Ku} , sR _{Ku}	Sku
sP _{dq} , sW _{dq} , sR _{dq}	Sdq
sP _{tp} , sW _{tp} , sR _{tp}	Smr(c)
sP _{ci} , sW _{ci} , sR _{ci}	Vvc
sP _{vi} , sW _{vi} , sR _{vi}	Vvv

A Surf 3D-vel meghatározható, de az ISO DIS 25178–2-ben nem szereplő topográfiai jellemzők értelmezése:

sP_z, sW_z, sR_z felület tízpont magassága (ten point height of the surface)

Értelmezése:

$$S_z = \frac{\sum_{j=1}^5 |Z_{pj}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{ri}|}{5}$$

ahol Z_{pi} és Z_{vi} ($i=1,2,\dots,5$) az öt legmagasabb csúcs, valamint az öt legmélyebb völgy magassága, illetve mélysége az illeszkedő felülettől (sík felület esetében a középsíktól) mérve. Geometriai értelemben csúcsnak (illetve völgynek) tekinthető az a felületi pont, amelyik magasabb (illetve alacsonyabb) mint nyolc közvetlen szomszédja.

Mivel a mért felület a 2D-s profilméréstől eltérően nincs részekre osztva, a fenti definíció szerinti tízpont magasság az ISO/DIS 25178–2 által definiált S_z maximális magasság igen jó közelítéssel azonos értékű.

sP_{bi}, sW_{bi}, sR_{bi} hordozófelületi jelzőszám (surface bearing index)

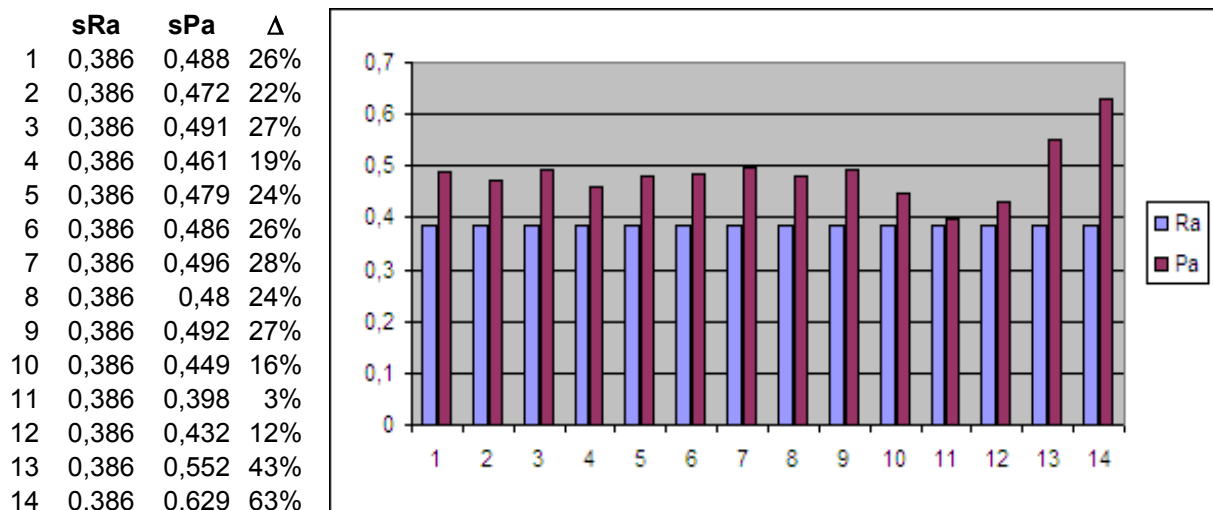
S_q (S_q) valamint az 5%-os hordozófelületi arányhoz tartozó profilmagasság hányadosa, vagyis

$$S_{bi} = \frac{S_q}{Z_{0,05}}$$

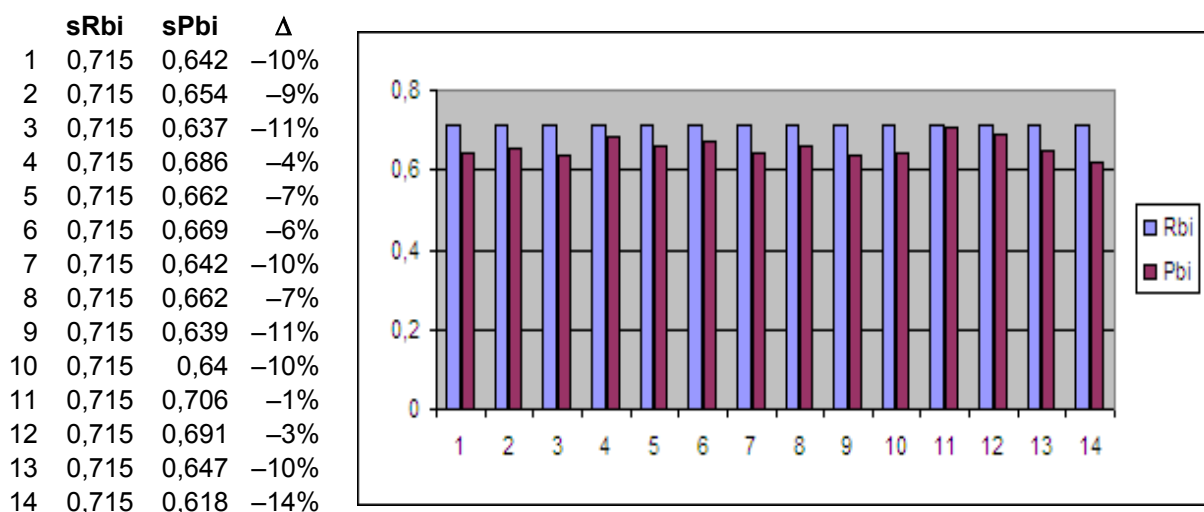
A nagyobb hordozófelületi jelzőszám jobb hordozótulajdonságokat jelez. Értéke a felület kopása során nő. Közvetlenül utal a felület bejáródási folyamatára, bejáródási viselkedésére.

2. Melléklet: Különböző hullámossággal végzett kiértékelések eredményei

2.1. A mikrotopográfia paramétereinek változása köszörült felületnél

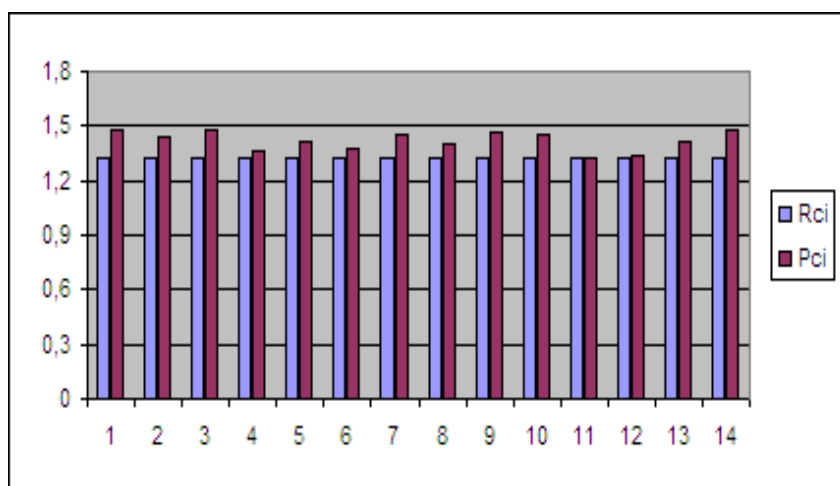


M2.1. táblázat. Az átlagos egyenetlenség változása köszörült felületnél



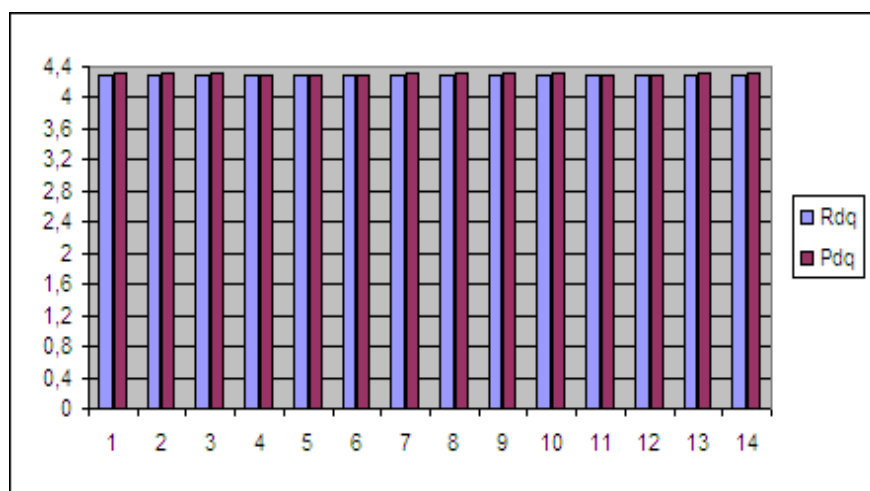
M2.2. táblázat. A hordozófelületi jelzőszám változása köszörült felületnél

	sRci	sPci	Δ
1	1,324	1,479	12%
2	1,324	1,441	9%
3	1,324	1,473	11%
4	1,324	1,357	2%
5	1,324	1,419	7%
6	1,324	1,376	4%
7	1,324	1,455	10%
8	1,324	1,397	6%
9	1,324	1,467	11%
10	1,324	1,45	10%
11	1,324	1,324	0%
12	1,324	1,34	1%
13	1,324	1,418	7%
14	1,324	1,477	12%



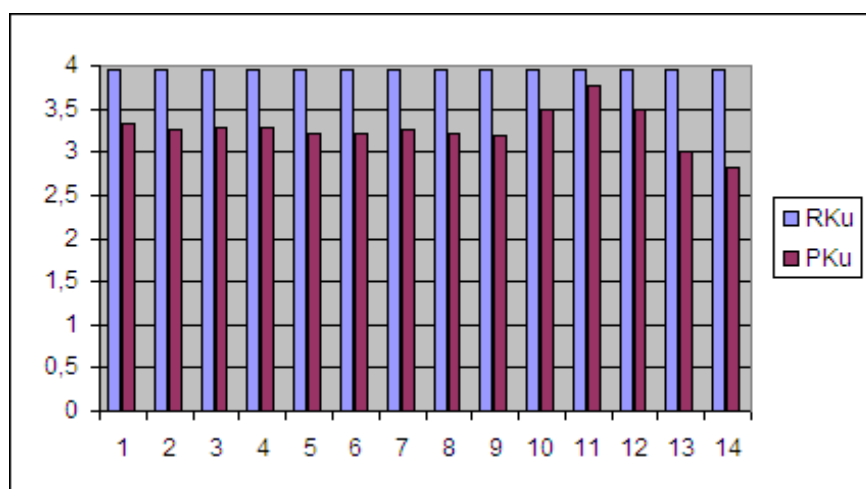
M2.3. táblázat. A magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám változása köszörült felületnél

	sRdq	sPdq	Δ
1	4,299	4,311	0%
2	4,299	4,309	0%
3	4,299	4,313	0%
4	4,299	4,302	0%
5	4,299	4,302	0%
6	4,299	4,302	0%
7	4,299	4,308	0%
8	4,299	4,307	0%
9	4,299	4,307	0%
10	4,299	4,306	0%
11	4,299	4,3	0%
12	4,299	4,301	0%
13	4,299	4,305	0%
14	4,299	4,308	0%



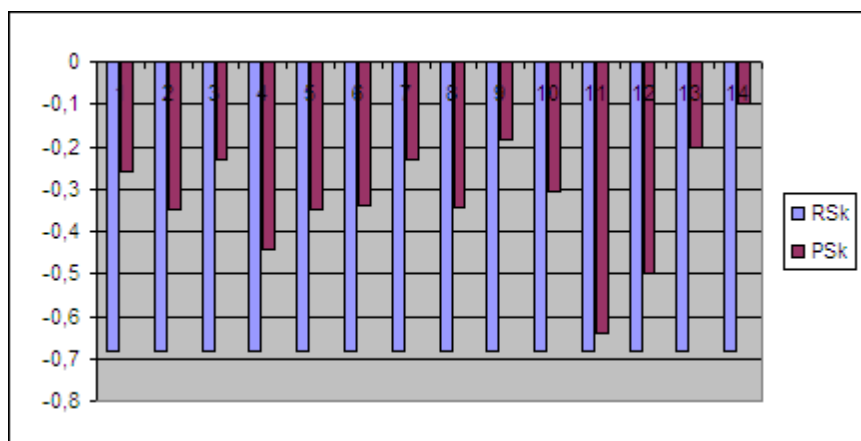
M2.4. táblázat. A felület közepes dőlésének változása köszörült felületnél

	sRku	sPku	Δ
1	3,96	3,329	-16%
2	3,96	3,267	-18%
3	3,96	3,293	-17%
4	3,96	3,29	-17%
5	3,96	3,221	-19%
6	3,96	3,216	-19%
7	3,96	3,27	-17%
8	3,96	3,219	-19%
9	3,96	3,188	-19%
10	3,96	3,49	-12%
11	3,96	3,78	-5%
12	3,96	3,492	-12%
13	3,96	2,995	-24%
14	3,96	2,831	-29%



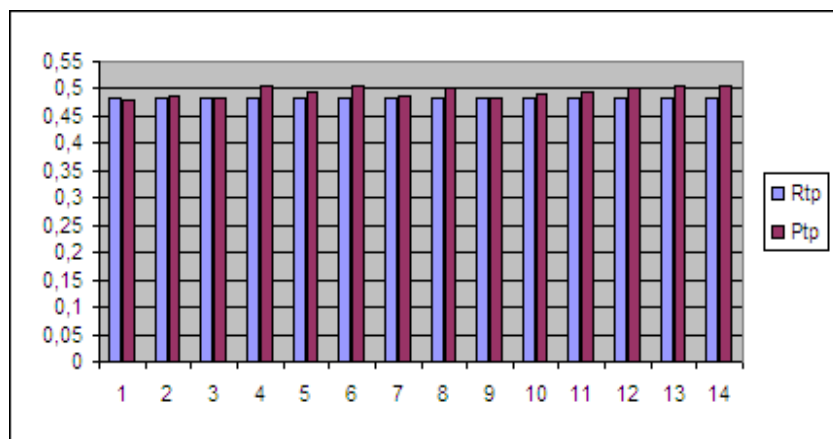
M2.5. táblázat. A lapultsági mérőszám változása köszörült felületnél

	sRsk	sPsk	Δ
1	-0,681	-0,26	0,42
2	-0,681	-0,349	0,33
3	-0,681	-0,23	0,45
4	-0,681	-0,441	0,24
5	-0,681	-0,348	0,33
6	-0,681	-0,339	0,34
7	-0,681	-0,229	0,45
8	-0,681	-0,345	0,34
9	-0,681	-0,183	0,50
10	-0,681	-0,305	0,38
11	-0,681	-0,64	0,04
12	-0,681	-0,501	0,18
13	-0,681	-0,202	0,48
14	-0,681	-0,101	0,58



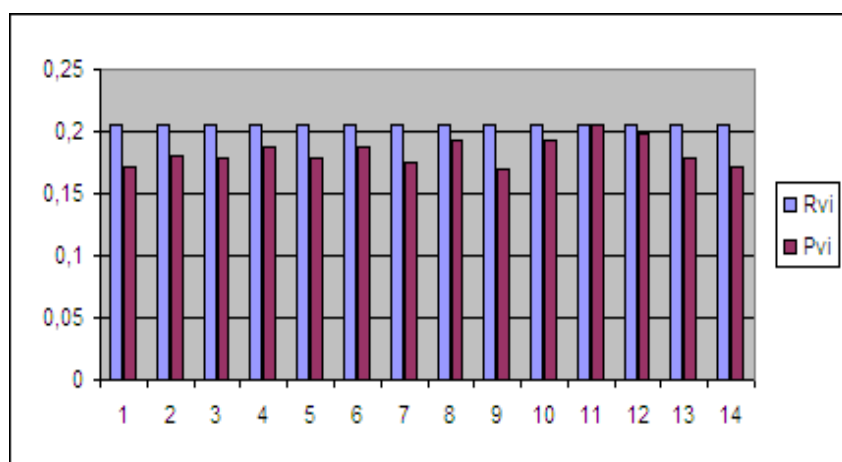
M2.6. táblázat. A ferdeségi mérőszám változása köszörült felületnél

	sRtp	sPtp	Δ
1	0,482	0,478	-1%
2	0,482	0,487	1%
3	0,482	0,483	0%
4	0,482	0,504	5%
5	0,482	0,496	3%
6	0,482	0,505	5%
7	0,482	0,485	1%
8	0,482	0,5	4%
9	0,482	0,483	0%
10	0,482	0,492	2%
11	0,482	0,493	2%
12	0,482	0,503	4%
13	0,482	0,504	5%
14	0,482	0,504	5%



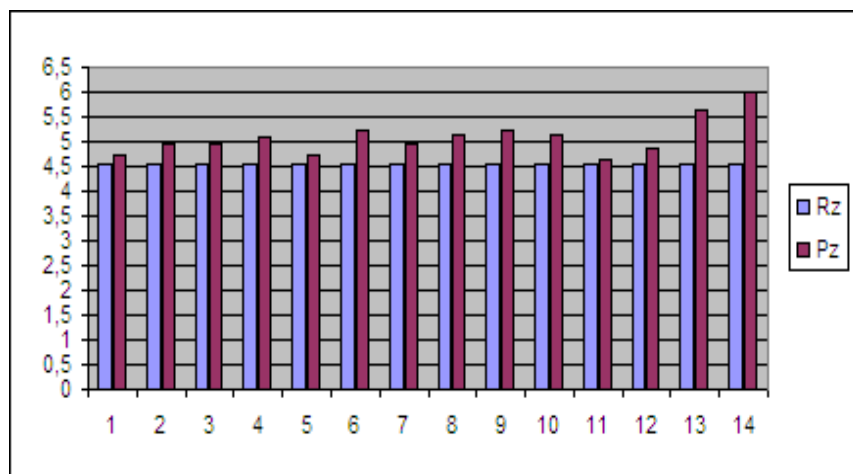
M2.7. táblázat. A hordozófelületi arány változása köszörült felületnél

	sRvi	sPvi	Δ
1	0,205	0,172	-16%
2	0,205	0,181	-12%
3	0,205	0,179	-13%
4	0,205	0,188	-8%
5	0,205	0,178	-13%
6	0,205	0,187	-9%
7	0,205	0,175	-15%
8	0,205	0,192	-6%
9	0,205	0,17	-17%
10	0,205	0,192	-6%
11	0,205	0,205	0%
12	0,205	0,198	-3%
13	0,205	0,178	-13%
14	0,205	0,171	-17%



M2.8. táblázat. A völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám változása köszörült felületnél

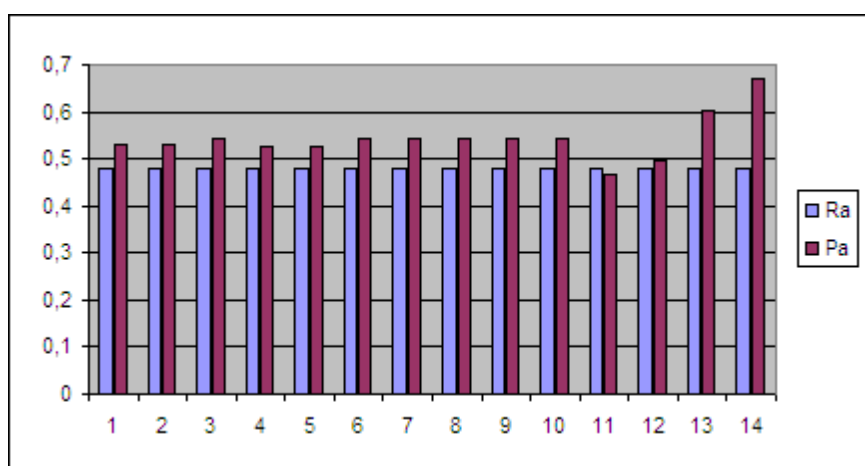
	sRz	sPz	Δ
1	4,567	4,748	4%
2	4,567	4,957	9%
3	4,567	4,949	8%
4	4,567	5,078	11%
5	4,567	4,737	4%
6	4,567	5,244	15%
7	4,567	4,974	9%
8	4,567	5,115	12%
9	4,567	5,21	14%
10	4,567	5,151	13%
11	4,567	4,628	1%
12	4,567	4,868	7%
13	4,567	5,626	23%
14	4,567	6,008	32%



M2.9. táblázat. A tízpont magasság változása köszörült felületnél

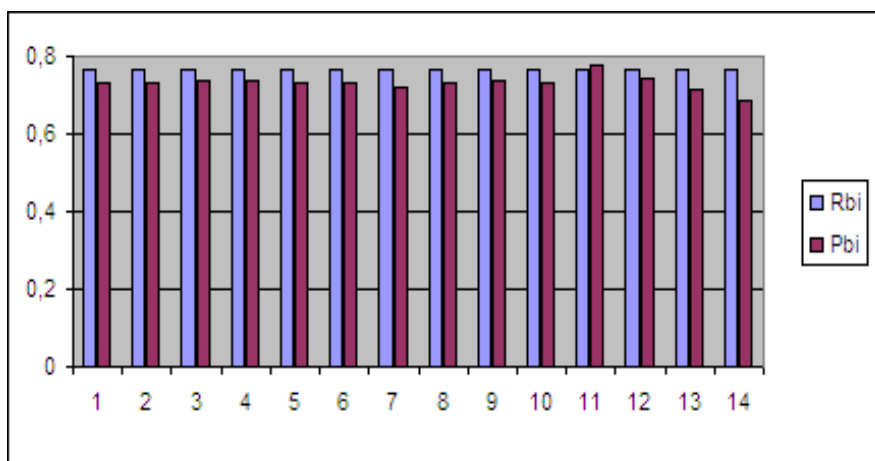
2.2. A mikrotopográfia paramétereinek változása szikraforgácsolt felületnél

	sRa	sPa	Δ
1	0,479	0,53	11%
2	0,479	0,531	11%
3	0,479	0,545	14%
4	0,479	0,526	10%
5	0,479	0,528	10%
6	0,479	0,541	13%
7	0,479	0,543	13%
8	0,479	0,543	13%
9	0,479	0,544	14%
10	0,479	0,542	13%
11	0,479	0,467	-3%
12	0,479	0,496	4%
13	0,479	0,601	25%
14	0,479	0,67	40%



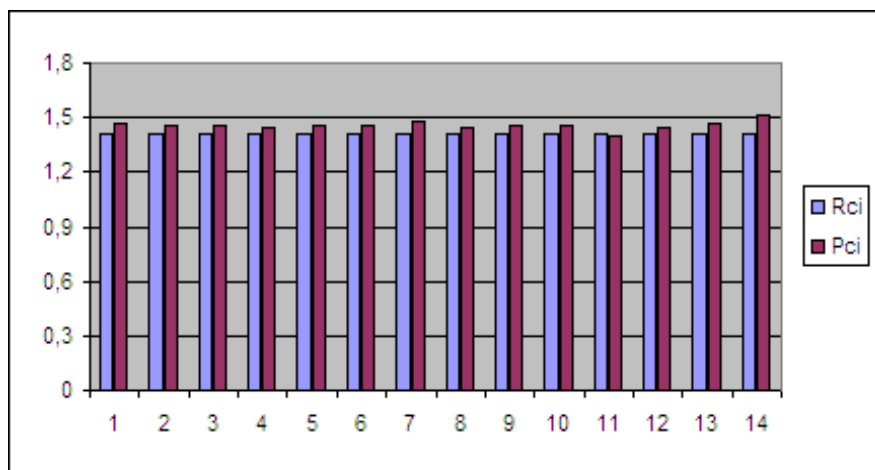
M2.10. táblázat. Az átlagos egyenetlenség változása szikraforgácsolt felületnél

	sRbi	sPbi	Δ
1	0,767	0,732	-5%
2	0,767	0,734	-4%
3	0,767	0,735	-4%
4	0,767	0,737	-4%
5	0,767	0,733	-4%
6	0,767	0,733	-4%
7	0,767	0,72	-6%
8	0,767	0,733	-4%
9	0,767	0,735	-4%
10	0,767	0,732	-5%
11	0,767	0,78	2%
12	0,767	0,743	-3%
13	0,767	0,712	-7%
14	0,767	0,685	-11%



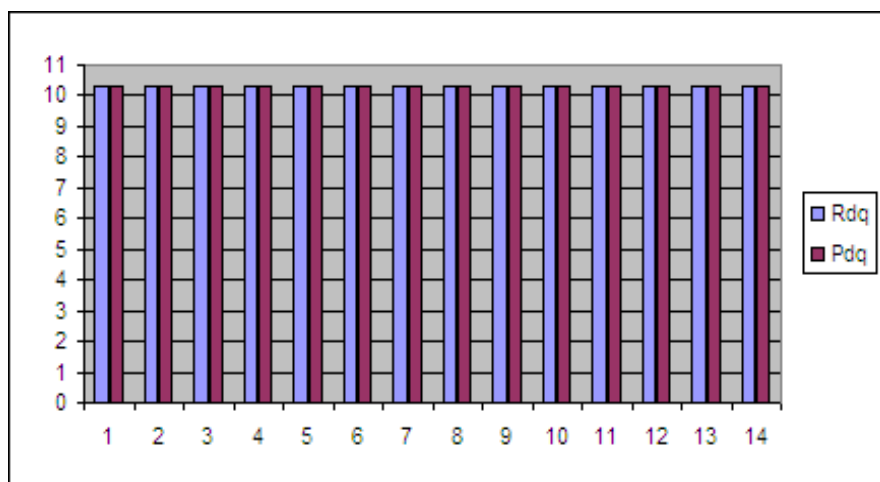
M2.11. táblázat. A hordozófelületi jelzőszám változása szikraforgácsolt felületnél

	sRci	sPci	Δ
1	1,415	1,463	3%
2	1,415	1,455	3%
3	1,415	1,455	3%
4	1,415	1,445	2%
5	1,415	1,461	3%
6	1,415	1,455	3%
7	1,415	1,482	5%
8	1,415	1,449	2%
9	1,415	1,453	3%
10	1,415	1,456	3%
11	1,415	1,402	-1%
12	1,415	1,446	2%
13	1,415	1,473	4%
14	1,415	1,51	7%



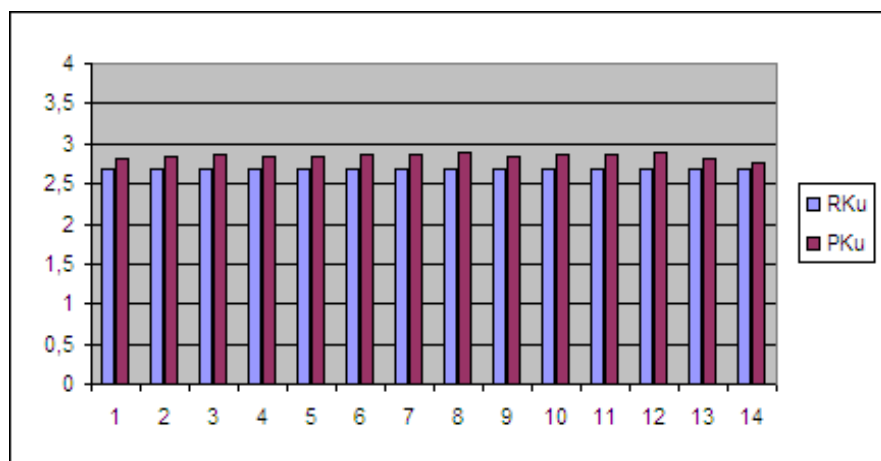
M2.12. táblázat. A magzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám változása szikraforgácsolt felületnél

	sRdq	sPdq	Δ
1	10,316	10,32	0%
2	10,316	10,317	0%
3	10,316	10,319	0%
4	10,316	10,314	0%
5	10,316	10,314	0%
6	10,316	10,314	0%
7	10,316	10,316	0%
8	10,316	10,316	0%
9	10,316	10,316	0%
10	10,316	10,316	0%
11	10,316	10,313	0%
12	10,316	10,314	0%
13	10,316	10,315	0%
14	10,316	10,317	0%



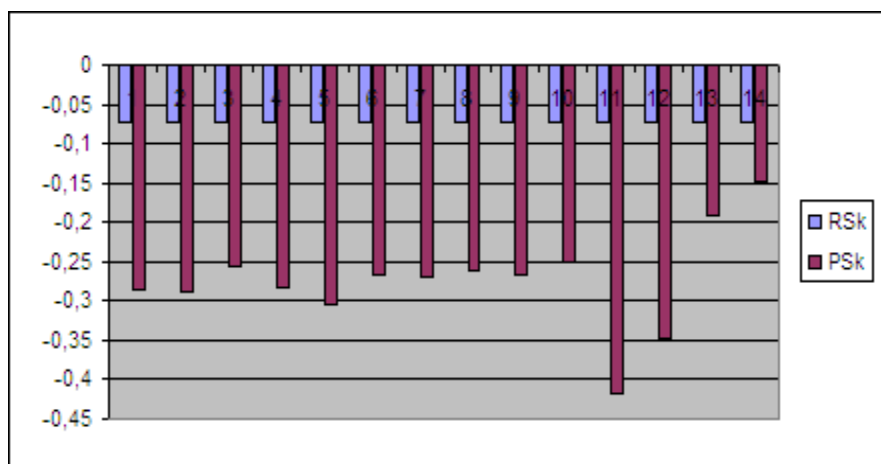
M2.13. táblázat. A felület közepes dőlésének változása szikraforgácsolt felületnél

	sRku	sPku	Δ
1	2,69	2,816	5%
2	2,69	2,832	5%
3	2,69	2,862	6%
4	2,69	2,837	5%
5	2,69	2,833	5%
6	2,69	2,866	7%
7	2,69	2,855	6%
8	2,69	2,888	7%
9	2,69	2,845	6%
10	2,69	2,865	7%
11	2,69	2,877	7%
12	2,69	2,883	7%
13	2,69	2,819	5%
14	2,69	2,758	3%



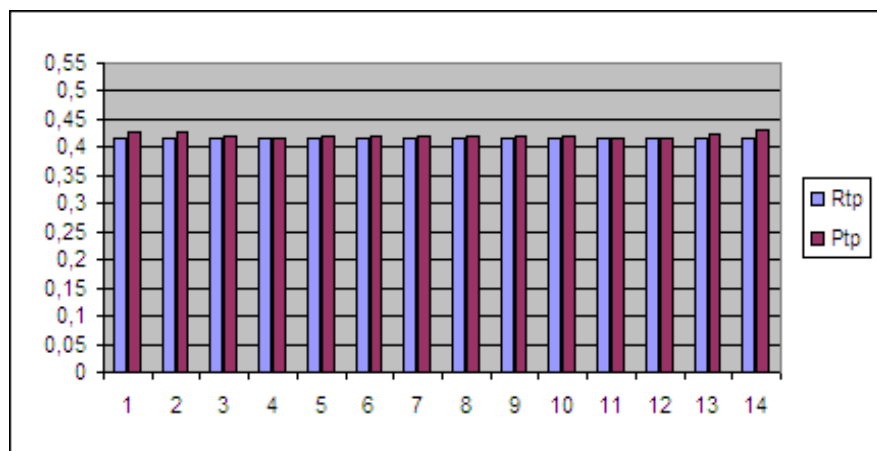
M2.14. táblázat. A lapultsági mérőszám változása szikraforgácsolt felületnél

	sRsk	sPsk	Δ
1	-0,072	-0,285	-0,21
2	-0,072	-0,287	-0,22
3	-0,072	-0,256	-0,18
4	-0,072	-0,284	-0,21
5	-0,072	-0,305	-0,23
6	-0,072	-0,268	-0,20
7	-0,072	-0,269	-0,20
8	-0,072	-0,262	-0,19
9	-0,072	-0,267	-0,20
10	-0,072	-0,25	-0,18
11	-0,072	-0,419	-0,35
12	-0,072	-0,347	-0,28
13	-0,072	-0,19	-0,12
14	-0,072	-0,149	-0,08



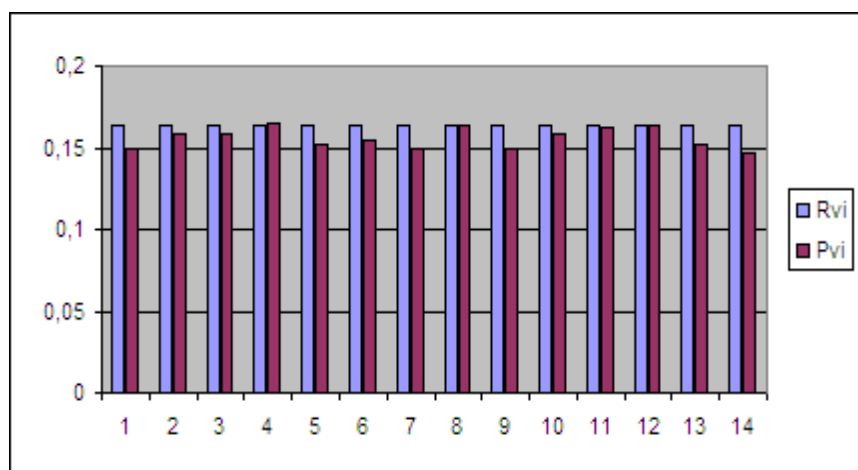
M2.15. táblázat. A ferdeségi mérőszám változása szikraforgácsolt felületnél

	sRtp	sPtp	Δ
1	0,418	0,427	2%
2	0,418	0,426	2%
3	0,418	0,42	0%
4	0,418	0,417	0%
5	0,418	0,419	0%
6	0,418	0,42	0%
7	0,418	0,42	0%
8	0,418	0,419	0%
9	0,418	0,42	0%
10	0,418	0,419	0%
11	0,418	0,417	0%
12	0,418	0,417	0%
13	0,418	0,424	1%
14	0,418	0,43	3%



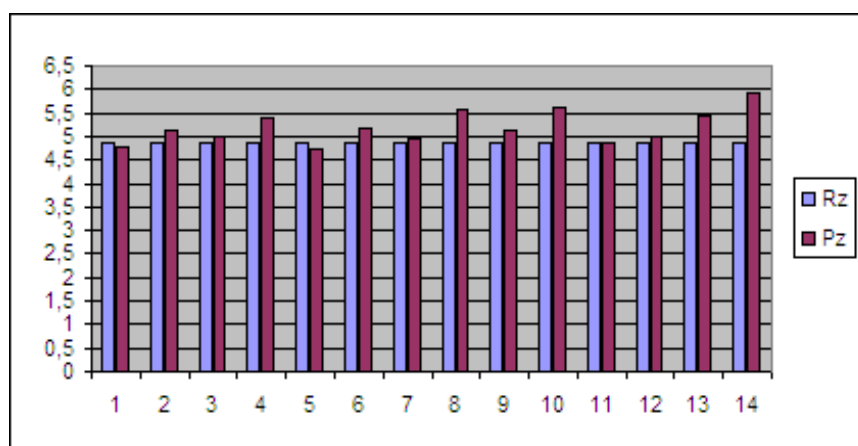
M2.16. táblázat. A hordozófelületi arány változása szikraforgácsolt felületnél

	sRvi	sPvi	Δ
1	0,164	0,149	-9%
2	0,164	0,159	-3%
3	0,164	0,158	-4%
4	0,164	0,165	1%
5	0,164	0,152	-7%
6	0,164	0,154	-6%
7	0,164	0,149	-9%
8	0,164	0,164	0%
9	0,164	0,15	-9%
10	0,164	0,159	-3%
11	0,164	0,162	-1%
12	0,164	0,164	0%
13	0,164	0,152	-7%
14	0,164	0,147	-10%



M2.17. táblázat. A völgyzóna kenőanyag-megtartási jelzőszám változása szikraforgácsolt felületnél

	sRz	sPz	Δ
1	4,854	4,782	-1%
2	4,854	5,133	6%
3	4,854	5,017	3%
4	4,854	5,382	11%
5	4,854	4,749	-2%
6	4,854	5,167	6%
7	4,854	4,95	2%
8	4,854	5,584	15%
9	4,854	5,125	6%
10	4,854	5,622	16%
11	4,854	4,861	0%
12	4,854	5,014	3%
13	4,854	5,459	12%
14	4,854	5,926	22%



M2.18. táblázat. A tízpont magasság változása szikraforgácsolt felületnél