

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**

**SZERZŐI ISMERTETŐJE**

Témavezető:  
**Dr. Sipos Jenő PhD, főiskolai tanár**

**Budapest  
2008**

## A tudományos probléma megfogalmazása

A tribológiai rendszerek tanulmányozása mögött komoly gazdasági szempontok húzódnak meg. Az American Society of Mechanical Engineers tanulmánya szerint a súrlódás és kopás okozta veszteség az Amerikai Egyesült Államokban eléri a GDP 2%-át. Korábbi németországi gazdasági jelentések ezt 4%-ra becsülik, és valószínűsíthető, hogy hazánkban ez az arány még rosszabb.

A tribológiai jelenségek rendkívül összetettek, és a terhelés alatt elmozduló felületek minőségét is komplex fogalomként kell értelmeznünk, amely magába foglalja a felületi mikrogeometria eltéréseit, 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.

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. Szakirodalmi adatok és saját, reprezentatívnak tekinthető felmérés alapján is kijelenthető, hogy az ipari gyakorlat a felület vizsgálatánál még ma is szinte csak az érdesség néhány magasság irányú paramétereit használja, a hullámosság jellemző paramétereinek előírásával nagyon ritkán találkozhatunk.

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 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.

**A hullámosság kiértékléstechnikájának megoldatlan kérdései, a különböző rendű egyenetlenségek szétválasztására szolgáló szűrési módszerek alkalmazásának elemzése, a hullámosság jellemzésének 3D-s kiterjesztése, valamint a hullámosság és a működés kapcsolatának vizsgálata tudományos kutatást igényelnek.**

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.

Az értekezés 2008 első negyedévének végéig elért eredményeimet ismerteti. Munkámmal a hullámossággal kapcsolatos egyes fontos kérdésekre kívántam választ adni. Ezek megfogalmazása során értelem szerűen újabb kérdések vetődtek fel, újabb kutatási célok fogalmazódtak meg. Az értekezés eredményei a gyakorlati hasznosíthatóságon túl a hullámosság további kutatásához is alapot nyújtanak.

## **Kutatási célok**

Kutatásom során az alábbi kutatási célokat tűztem ki:

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 súrlódás 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 értekezés 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.

## **Kutatási módszerek**

A kutatás során feldolgoztam a kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalmat, elért részeredményeimet az irodalomjegyzékben részletezett publikációkban ismertettem, szakmai konferenciákon előadtam.

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 metszettapintós 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 középvasal- és motív paramétereinek kutatási célú meghatározására is alkalmas szoftvereket, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszéke és a BMF-BGK együttműködésében, közreműködéssel is kidolgozott Surf3D mikrotopográfiai kiértékelő szoftvert, a BMF kutatói által kifejlesztett amplitúdó sűrűség spektrum (PSD) kiértékelő programot, valamint a National Institute of Standards and Technology (NIST) keretein belül kifejlesztett, szabadon felhasználható, interneten elérhető szoftvert.

A felületi textúra hullámosságának hatását a működési tulajdonságokat jellemző 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 NURBS modellező szoftver bizonyult a legmegfelelőbbnek.

A módszer használhatóságának igazolására különböző hullámhossz és amplitúdó kombinációjú felületeket generáltam, ezekre orientált (köszörült) és irányultság nélküli (szikraforgácsolt) valós felületek mért érdességi topográfiáját szuperponáltam. Az érdességi topográfia, valamint az érdességet és hullámosságot is tartalmazó felületek esetében meghatároztam a működési tulajdonságokat jellemző paramétereket, ezek összehasonlító elemzésével a hullámosság hatására vonatkozó következtetéseket vontam le.

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.

A Persson féle analitikus modellel elemeztem a valós érintkezési tartomány nagyságát, ennek eredményeivel a koptatókísérletekből levont következtetéseimet támasztottam alá.

## **Az elvégzett kutatás rövid ismertetése fejezetenként**

Az **első fejezetben** a szakirodalmi utalások és saját korábbi kutatási eredményeim alapján a téma aktualitását mutattam be. Ez a fejezet tartalmazza a kutatási célokat és az azok megvalósításához vezető módszerek ismertetését is.

A **második 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 gépkatrészek működését, például siklócsapágyak, vezetékek, fegyverzárak, gördülőcsapágyak, statikus tömitések esetében. A súrlódó gépkatrészek és az azzal kapcsolatos problémák **katonai jelentőségét** igazolja USACE<sup>1</sup> által az Amerikai Egyesült Államok hadserege számára készített összefoglaló tanulmány, ami kiemeli a felületi hullámosság és érdesség által meghatározott valós és a névleges érintkezési tartomány közötti különbség tribológiai jelentőségét.

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

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 hullámosság figyelmen kívül hagyásával tehát a működési tulajdonságokra vonatkozó következtetéseink tévesek lehetnek.

A fejezet fontos megállapítása szerint ahhoz, 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.

A **harmadik fejezetben** 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 a 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 a hullámosság jellemzésére szolgáló 2D-s és 3D-s paraméterek részletes ismertetését az 1. Melléklet tartalmazza. Rendszereztem és értelmeztem a 2D-s hullámosság műszaki dokumentációkban való előírásának szabályait, javaslatokat tettem a 3D-s előírás szempontjaira.

A **negyedik fejezetben** a hullámosság és a működés kapcsolatára vonatkozó vizsgálataimat és azok eredményeit mutattam be.

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 topográfiaikat tartalmazó felületek esetében vizsgáltam a hullámosság működési paraméterekre gyakorolt hatását. A kiértékelések eredményeit a 2. Melléklet tartalmazza. A

---

<sup>1</sup> The United States Army Corps of Engineers

kidolgozott új eljárás a vizsgálatra alkalmas módszerek bizonyult, segítségével a hullámosság és a működési tulajdonságokat jellemző paraméterek kapcsolatára következtetések tudtam levonni.

A hullámosság és a sűrűlődségi tényező kapcsolatát koptatókísérletekkel vizsgáltam acél és ferrodó próbatesteket használva. Persson analitikus modelljével vizsgáltam a kopott felületek érintkezési viszonyait, és az eredményeket a kísérletek eredményeiből levont következtetések alátámasztására használtam fel.

Az **ötödik fejezet** a kutatási eredményeket tézisek formájában foglalja össze, és ismerteti az eredmények hasznosítási lehetőségeit.

A csatolt „Jelölések jegyzéke” az értekezésben használt, túlnyomórészt a mikrogeometriai, illetve mikrotopográfiai jellemzőkre vonatkozó jelöléseket foglalja össze, tartalmazza a jelölt mennyiség mértékegységét, magyar és angol (esetenként német) megnevezését.

## **Összegzett következtetések**

Az ipari gyakorlat ma még alig veszi figyelembe a hullámosság működésre gyakorolt hatását, a hullámosság tervezésére és előírására ritkán kerül sor.

A hullámosságnak komoly szerepe van a technológiai folyamatok minősítésében, mert az adott gyártmány felületi hullámosságából a gyártási folyamatra következtetések vonhatók le. Saját méréseimmel is bizonyítottam, hogy a hullámosság sok esetben befolyásolja a terhelés alatt elmozduló gépkatrészek működését is, ezért tervezésére, előírására és mérésére szükség van. A gyakran szélsőséges üzemeltetési körülmények következtében ez a megállapítás a honvédségnél működő technikai eszközök esetében különösen helytálló. A gyártáson és a működésen túl a tönkremeneteli folyamatok elemzése során is információt nyújthat a hullámosság kiértékelése, például fegyvercsövek esetében.

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.

A hullámosság-kiértékelés folyamatának egyik alapvető jelentőségű tényezője az érdesség, hullámosság és alakhiba szétválasztására szolgáló szűrés. A szakterület kutatói számos szűrési eljárást dolgoztak ki, melyeknek csak kis hányada szabványosított. A kutatás keretében elvégeztem a különböző szűrési eljárások elemzését, ismertettem azok előnyeit és hátrányait, kitértem 3D-s használhatóságukra.

A különböző szűrési eljárások elemzése alapján megállapítottam, 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 szűrés vonatkozásában az egyik fejlődési tendenciát a legelterjedtebben használt és szabványosított Gauss szűrés hátrányos tulajdonságait kiküszöbölő közép vonalas 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.

A hullámosság egyértelmű és összehasonlítható eredményeket nyújtó kiértékelésének gátja egyes mérési feltételek (mintavételi távolság, kiértékelési hossz, kiértékelési szakasz, kiértékelési terület), előírásának hiánya. Ezekre vonatkozóan mérésekkel alátámasztott javaslatokat dolgoztam ki.

Az ISO szabványok, szabványtervezetek és ágazati előírások a felületi hullámosság nagyszámú 2D-s és 3D-s paraméterét definiálják. A kutatás, az ipari gyakorlat és a műszaki képzés számára egyaránt hiányzik ezek összefoglaló ismertetése. Ezért a kutatás keretében elvégeztem a hullámosság jellemzésére szolgáló 2D-s és 3D-s paraméterek rendszerezését és részletes ismertetését, emellett rendszereztem és értelmeztem a 2D-s hullámosság műszaki dokumentációkban való előírásának szabályait, javaslatokat tettem a 3D-s előírás szempontjaira.

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. Ezért új módszert dolgoztam ki, amely a felületi mikrotopográfia hullámosság-komponensét matematikai úton generálja. A módszer alkalmazhatóságát kiértékelésekkel igazoltam.

Acél–ferrodo anyagpárral végzett koptatókísérletekből levont következtetésem, hogy a felület hullámossága a sűrűláda tényező csökkenését eredményezi. Feltételezésem szerint ennek oka a kisebb valós érintkezési felület. A kopott felületek érintkezési viszonyait Persson modelljével vizsgáltam, és az eredményeket a kísérletek eredményeiből levont következtetések alátámasztására használtam fel.

## Új tudományos eredmények

### I. TÉZIS

Az érdességi (R) paraméterek előírásánál az EN ISO 1302 nem teszi kötelezővé az érdesség és hullámosság szétválasztására szolgáló szűrő  $\lambda_c$  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 rögzíthetősége. 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  $\Delta x(\Delta y) = 10$   $\mu$ m lépésköz,

- finoman megmunkált felületeknél, ahol az érdességi paraméterek kis értéke miatt az érdességet leválasztó szűrő cut-offja  $\lambda_c=0,08$  mm,  $\Delta x(\Delta y)=5\mu\text{m}$  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 motív-kiértékelésre vonatkozó szabványelőírás létezik. A gyakorlatban általánosan használt középvezetési 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  $\lambda_f$  határhullámhosszával azonos értékűre kell választani, de  $\lambda_f$  értéke nincs meghatározva. A 3.2.4 fejezetben ismertetett mérési eredményeim kiértékelése alapján az alábbi értékeket javaslom:

- hullámosság értékelési szakasza:  $l_w=10\cdot\lambda_c$ ,
- 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 topográfiákat szuperponálva, tág határok közti nagytérközű egyenetlenséget tartalmazó topográfiák 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 topográfiákat 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 ( $s_w/s_{Ra}>0,5$ ) általában az amplitudótól függő mértékben  $S_{dq}$  és  $S_{tp}$  kivételével valamennyi topográfiai paraméterre hatással van.
- Jelentős mértékű a magasságeloszlási görbét jellemző, és a felület működési tulajdonságával összefüggésben lévő  $S_{sk}$  ferdeségi mérőszámra gyakorolt hatás, amely már kis hullámosság ( $s_w/s_{Ra}\leq 0,5$ ) esetén is jelentkezik.
- Az  $S_{tp}$  hordozófelületi arány számértéke a hullámosság hatására ugyan alig változik, de a topográfia nagyobb magassága következtében a kis változás is megváltozott működési tulajdonságokat jelent.
- Az  $S_{dq}$  felület átlagos hajlása paraméter értéke lényegében csak az érdességtől függ, a hullámosság hatása nem számottevő.
- Kis amplitúdójú hullámosság ( $s_w/s_{Ra}\leq 0,5$ ) a vizsgált paraméterekre az  $S_{sk}$  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 érdességgű 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.

## **Az eredmények hasznosításának lehetőségei, ajánlások**

Az értekezésben a hullámosság jelentőségének bemutatásával, a különböző rendű egyenetlenségek 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 (The United States Army Corps of Engineers) szakmai szervezet által, az Amerikai Egyesült Államok hadserege számára készült tanulmány 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 mikrojeometria 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 zárok 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 mikrojeometria tervezését és kiértékelését.
- A fegyvercsövek belső felületének kopása az üzembentartás oldaláról folyamatos felügyeletet igényel, a minősítés eszköze felületi mikrojeometria 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 forrásanyagként egyaránt felhasználható.

## A témában készült saját publikációk

- [1] Horváth, S.: **Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata**, BDGMF Jubileumi Tudományos Ülésszak – Bp. 1989. X. 10. III. kötet, p.76–79, 1989.
- [2] Horváth, S.: **Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata**, BME Gépész-mérnöki Kar, Egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1990.
- [3] Horváth, S., Palásti, K. B.: **Új módszer gépalkatrészek felületi mikrogeometriájának jellemzésére**, Géptervezők VIII. Országos Szemináriuma, Miskolc, p. 101–105, 1991.
- [4] Palásti K., B., Horváth, S.: **Érdességmérő szolgáltatásaink kiterjesztése számítógéppel**, MicroCAD Konferencia, Miskolc, p. 64–69, 1991.
- [5] Palásti, K. B., Horváth, S.: **Felületi mikrogeometria, érdesség, hullámosság jellemző paraméterei**, Segédlet, BDGMF 1991.
- [6] Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata II. rész: A felületi hullámosság**, Gép, 1992/6, p. 9–13, 1992.
- [7] Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata III. rész: Speciális érdességi és hullámossági jellemzők**, Gép, 1992/7, p. 36–41, 1992.
- [8] Palásti, K. B., Horváth, S.: **A felületi mikrogeometria vizsgálata IV. rész. A kiértékelés számítógépes módszerei**, Gép 1992/8, p. 45–48, 1992.
- [9] Horváth, S., Palásti, K. B.: **Forschungsergebnisse der Oberflächengeometrie in Ungarn**, 4. Internationales DAAAM Symposium, Brno, p. 119–120, 1993.
- [10] Horváth, S., Palásti, K. B.: **A felületi hullámosság, mint a gépalkatrészek minőségének egyik összetevője**, Gép, 1993/10–11, p. 21–22, 1993.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Farkas, G., Horváth, S.: **Műszaki felületek mikrotopográfiai vizsgálata**, Fiala Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, ISBN 973–8231–442, p. 251–254, 2005.
- [15] Horváth, S.: **A felületi hullámosság jelentősége, a hullámosság 3D-s értelmezése**, Gép, 2005/9–10, p. 82–85, 2005.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Horváth, S., Czifra, Á.: **The importance of surface waviness; Problems with 3-D measuring and evaluation techniques**, „Gépészet 2006” Proceedings of Fifth Conference on 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.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Fekete, G., Czifra, Á., Horváth, S.: **„Ellentmondásos” eredmények mikrotopográfiai vizsgálatok esetén**, Műszaki szemle Technical review, 38. szám, ISSN 1454–0746, p. 102–105, 2007.
- [22] Czifra Á, Horváth S: **Asperity analysis of worn surfaces**, ECOTRIB 2007, European Conference on Tribology Szlovénia, p. 307–315, 2007.
- [23] Czifra, Á., Horváth, S., Pál, A.: **A mikrotopográfia változása száraz súrlódás esetén**, Gép, 2007/10–11 ISSN 0016–8572, p.28–31, 2007.
- [24] Czifra, Á., Váradi, K., Horváth, S.: **Three dimensional asperity analysis of worn surfaces**, Meccanica Journal, Online, ISSN 1572–9648, 2008.
- [25] Horváth, S., Czifra, Á.: **Effect of surface waviness in sliding behavior of engineering surfaces**, „Gépészet 2008” Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, ISBN 978-963-420-947-8, CD, 2008.
- [26] Horváth, S., Gyurecz, Gy.: **Műszaki felületek hullámosságának modellezése**, Műszaki szemle Technical review, Különszám, ISSN 1454–0746, p. 165–168, 2008.
- [27] Horváth, S.: **A felületvizsgálat korszerű szűrési módszerei**, Műszaki szemle Technical review, Különszám, ISSN 1454–0746, p. 173–179, 2008.

### **A témában készült saját publikációkra kapott külső hivatkozások**

- [2] 1 db
- [6] 3 db
- [7] 4 db
- [8] 2 db
- [9] 1 db
- [11] 1 db
- [16] 1 db
- [17] 1 db

### **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.

## Szakmai-tudományos életrajz

<b>Név:</b>	<b>Dr. Horváth Sándor</b>
<b>Születési hely, idő:</b>	Szombathely, 1951. június 17.
<b>Anyja neve:</b>	Nagy Erzsébet
<b>Iskolák:</b>	2005-2006 ZMNE Katonai Műszaki Doktori Iskola 1987-1990 BME doktori cselekmény 1981-1985 ELTE ITK német nyelvszak 1970-1975 BME Gépészmérnöki Kar
<b>Végzettség:</b>	okl. gépészmérnök BME, 278/1975. doktor univ. BME, 5237/1990. dec. 06. disszertáció: "Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata".
<b>Nyelvismeret:</b>	német felsőfokú állami C nyelvvizsga 00865/1985 angol alapfokú állami C nyelvvizsga 777218 (2006)
<b>Munkahelyek:</b>	1982- Bánki Donát Műszaki Főiskola, BMF tanársegéd, adjunktus, docens 1978-1982 MMG AM, gyártmányfejlesztő mérnök 1981-től konstrukciós csoportvezető 1975-1978 VIDEOTON, tud. segédmunkatárs 1969-1970 ÉLGÉP, lakatos
<b>Oktatási területek:</b>	Műszaki mechanika, Műszaki kommunikáció, Gépelemek, Műszaki német
<b>Kutatási területek:</b>	Technikai felületek topográfiai vizsgálata, különös tekintettel a felületi hullámosságra, Technikatörténet
<b>Publikációk száma:</b>	11 könyv, ill. jegyzet, 49 folyóiratcikk, ill. konferenciakiadvány magyar, angol és német nyelven
<b>Vezetői megbízások:</b>	<b>Hivatkozások száma:31</b> 1981-1982 konstrukciós csoportvezető MMG AM 1990-2006 oktatási főigazgató-helyettes BDMF, BMF-BGK 2007- oktatási dékánhelyettes BMF-BGK 2001- intézetigazgató BMF-BGK GBI
<b>Jelentősebb szakmai közéleti megbízások:</b>	2002-2004 Nemzeti Bologna Bizottság, műszaki szakbizottság, tag 2004-2007 MAB Had- és haditechnikai tudományok bizottsága, tag 2005- GÉP szerkesztőbizottság, tag 2004- Konferenciák Bologna Bizottsága Had- és biztonságtechnika albizottság, állandó tag 2007- OGÉT Tudományos Bizottsága, tag
<b>Szakmai tanulmányutak:</b>	1991 bajor műszaki felsőoktatás tanulmányozása (2x1 hét) 1995 német nyelvű képzéshez anyaggyűjtés (FEFA 530/2) FH Regensburg (2 hét) 1995 minőségbiztosítás a felsőoktatásban (TEMPUS) Hollandia (1 hét) 1995 a német post-secondary képzés tanulmányozása (1 hét) 1997 felsőoktatási menedzsment kurzus Hollandia (1 hét) 1998 diáktanácsadó rendszer tanulmányozása Németo. (1 hét)
<b>Kitüntetések:</b>	Bánki Emlékérem 1998 ( <i>Főiskolai Tanács</i> ) Magyar Felsőoktatásért Emlékplakett 2002 ( <i>oktatási miniszter</i> ) BMF Emlékgyűrű 2005 ( <i>Főiskolai Szenátus</i> ) EMT Jubileumi Emléklap 2007