

# AZ ÉRDESSÉGMÉRÉS ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK LEHETŐSÉGEI ÉS KORLÁTAI MŰSZAKI KERÁMIÁK KOPÁSVIZSGÁLATA SORÁN

## THE POSSIBILITIES AND PROBLEMS OF ROUGHNESS MEASUREMENTS IN CASE OF CERAMICS WEAR TESTING

Koncsik Zsuzsanna<sup>1</sup>, Molnár Viktor<sup>2</sup>, Marosné Berkes Mária<sup>3</sup>, Kuzsella László<sup>4</sup>

### ABSTRACT

*Roughness and tribological tests of silicon-nitride composites with different amount of C-nanotubes were carried out. The basic aim of the investigation was to determine what are the possibilities and problems in the roughness measurement in case of ceramic wear. For this reason the initial two- and three dimensional roughness parameters of the samples ( $R_a - S_a$ ,  $R_z - S_z$ ,  $P - S_{mc}$  at a given bearing ratio or material ratio), and the worn volume was measured using roughness measurement technics.*

### 1. BEVEZETÉS

A műszaki kerámiák kedvező mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően – nagy keménység, hőszokkállóság, hőállóság, kis sűrűség – nagy hőmérsékletű, kopásnak kitett alkalmazásokban képesek leginkább a fémes alkatrészek helyettesítésére. Napjaink anyagtechnológiai fejlesztései a kerámiák terén is a kompozit anyagok létrehozása irányában bővül, biztosítva ezzel egy-egy alkalmazásban nélkülözhetetlen tulajdonságot, különleges tulajdonság-kombinációt. Ilyen például a szilárd fázisú önkenés lehetősége kopási alkalmazásokban, elektromosan vezető kerámia anyag létrehozása különösen nagy hőmérsékletű igénybevételeknél, repedésterjedést akadályozó fázis adagolása a kedvezőbb törési szívósság elérése érdekében.

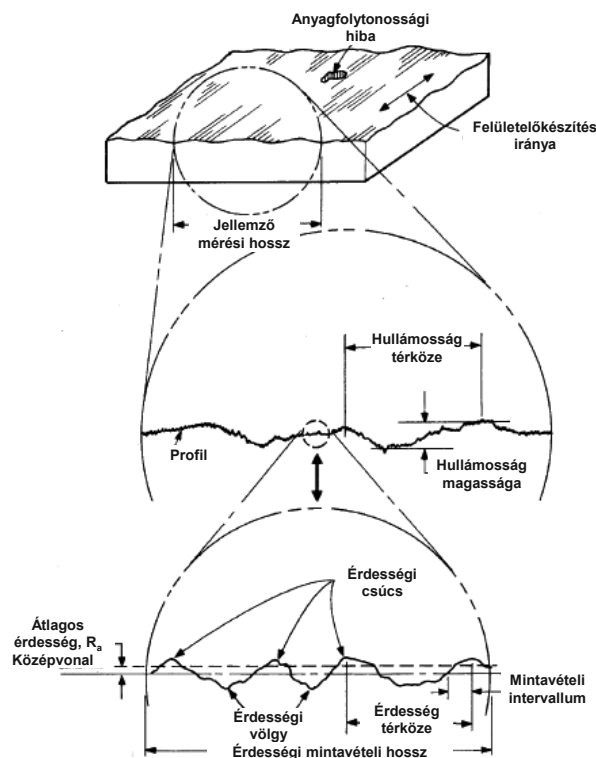
Az új anyagtechnológiai fejlesztések eredményeként létrejövő kerámia kompozitok tribológiai viselkedésének vizsgálata éppen ezért napjaink egyik fontos, meghatározó kutatási területe.

Minden tribológiai rendszer egy összetett rendszer, amelyben több befolyásoló tényező egyidejűleg határozza meg egy adott anyag és a kopási ellenpárja közötti kopási viselkedést. A számos befolyásoló tényező közül a kopással szembeni ellenállás szempontjából az egyik legmeghatározóbb szerepet az érintkező felületek érdessége játssza.

A cikk fő témája a háromdimenziós konfokális érdességmérés alkalmazási lehetőségeinek és korlátainak bemutatása, egy új anyagtechnológiai fejlesztésű, többfalú karbon-nanocsővel adalékolt szilícium-nitrid mintákon végzett, pin-on-disc elvű kopásvizsgálat során.

### 2. ELMÉLETI MEGFONTOLÁSOK

A tribológiai alkalmazások és kísérletek során felületek kerülnek egymással kapcsolatba, amely felületek fizikai és kémiai tulajdonságainak ismerete kulcsfontosságú. A számos fizikai tulajdonság közül jelen cikk a felületek geometriai megjelenésével foglalkozik, azon belül is a felületi textúra – 1. ábra – hullámossági és érdességi paraméterei közül bővebben a felületi érdességi paraméterek változásával, mérési lehetőségeivel és nehézségeivel.



1. ábra. A felületek textúrája [1]

<sup>1</sup> tanársegéd, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

<sup>2</sup> egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék

<sup>3</sup> egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

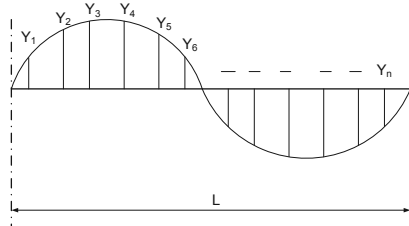
<sup>4</sup> egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

A felületek jellemzése egyrészt a vizsgálatok megkezdése előtt, a kiinduló érdességi paraméterek megadásával lehetséges, mindkét érintkező párra vonatkozóan, másrészt ez a kiinduló érdesség fog változni a kopásvizsgálat során, az uralkodó kopási mechanizmustól függően az érdességi csúcsok letöredezésével, vagy éppen képlékeny alakváltozásával [2].

Ebben a cikkben kizárólag pin-on-disc jellegű kopásvizsgálatra korlátozódnak a vizsgálati eredmények. A kopásvizsgálat során keletkező kopásnyom, illetve a kopásnyomból kikopott anyag térfogata több módszerrel jellemezhető. Amennyiben a kikopott térfogat kellően nagy, úgy a tömegmérés a vizsgálat előtt és a vizsgálatot követően megfelelő mérési módszerrel lehet. Műszaki kerámiáknál azonban az a tapasztalat, hogy hosszabb távú, és nagyobb terhelőerővel végzett vizsgálatok esetén sem jön létre akkora anyagvesztés, amely legalább 10-100 mg tömegű anyag kikopását eredményezné, így a tömegmérés pontatlan módszernek bizonyul. Ilyen esetekben a felületen keletkező kopásnyom térfogatát szintén érdességméréssel határozhatjuk meg.

### 2.1. A kiinduló felületek érdességének jellemzése

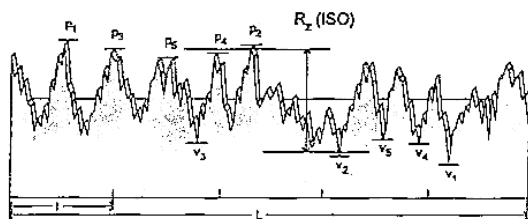
A mérnöki gyakorlatban anyagminőségtől függetlenül a felületek érdességének meghatározásakor a kétdimenziós mérőszámok közül két jellemző paramétert, az  $R_a$  és az  $R_z$  értékét adják meg. Az  $R_a$ , átlagos érdesség matematikailag egy átlagértéket jelent – 2. ábra –, a teljes mért kétdimenziós profil hosszán.



2. ábra. Az  $R_a$  érték matematikai származtatása [3]

$$R_a = \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n} \quad (1)$$

Az  $R_z$  értéket más néven "10 pont magasság"-nak is nevezik, amelynek számítása során a vizsgált profilhosszon az 5 legmagasabb és az 5 legmélyebb pont középvonalától mért átlagát értjük (ld. 3. ábra).



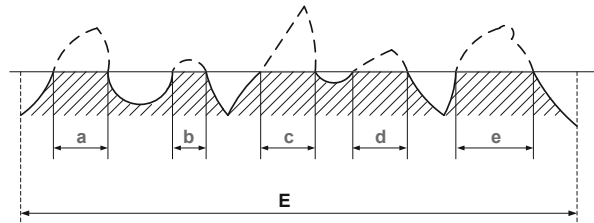
3. ábra. Az  $R_z$  érték matematikai származtatása [3]

Ezt a paramétert különösen nagyon rövid profilhosszak mérése esetén célszerű alkalmazni [4].

Az  $R_z$  számítására szolgáló összefüggés:

$$R_z = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{10} \quad (2)$$

Ezen két általános érdességi paraméteren túl, a műszaki kerámiákon végzett megelőző kopásvizsgálataink során bebizonyítottuk [2], hogy egy további érdességi paraméter, a hordozóhossz szorosabb kapcsolatba hozható a kopási tényező várható értékével. A hordozóhossz az a tényleges hossz a lemért profilon, amelyen az érintkező ellentest ténylegesen elmozdul, tehát az anyag kopása szempontjából mérhető felülete. Az érdességi csúcsok kopásának előrehaladtával a hordozóhosszat jelölő vonal egyre mélyebbre húzódik a profilon, illetve hossza egyre növekszik. Ez az  $R_{mr}$  – vagy más irodalmak jelölése szerint  $t_p$  –, úgynevezett anyaghányad, amelynek értékét %-ban fejezzük ki, a hordozó felület hosszának aránya a profil hosszához képest, egy adott mélységben a profil legmagasabb csúcsától mérve.



4. ábra. Az  $R_{mr}$  érték származtatása [3]

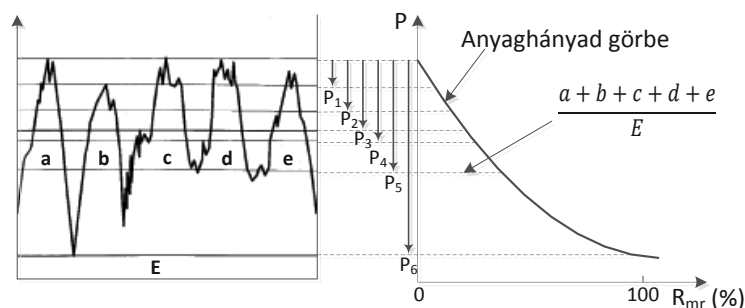
Az  $R_{mr}$  értéket matematikailag az alábbi összefüggés segítségével határozzuk meg:

$$R_{mr} = \frac{a + b + c + d + e}{E} \cdot 100\% \quad (3)$$

Az  $R_{mr}$  érték alkalmazásának korlátai a kopásvizsgálatok során a következők [4]:

- A hordozóhossz értéke egy hosszra vonatkoztatott hányadot jelent, nem a felület egy területére.
- Az  $R_{mr}$  értéke egy viszonylag rövid profil alapján határozható meg, nem veszi figyelembe a hullámosságból és egyéb geometriai adottságból eredő sajátosságokat.
- A gyakorlatban két érintkező felületről van szó, mindkettő hordozóhossza szerepet játszik a kopási folyamatban.

Az 5. ábrán feltüntetett  $R_{mr}$  érték, illetve a függőleges tengelyen feltüntetett mélység érték, P, amely például megadja, hogy a legmagasabb csúcstól mérve milyen mélységben érjük el az 50, illetve a 100 %-os hordozóhossz értéket szintén hasznos információkat hordoz a kopási folyamat szempontjából.

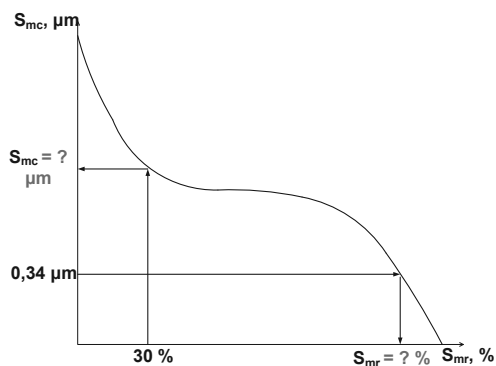


5. ábra. Az anyag-hányad görbe és az  $R_{mr}$  értékek [5]

Napjainkban a kétdimenziós letapogató tüvel ellátott profilométerek mellett egyre inkább teret hódítanak a háromdimenziós érdességmérő berendezések, amelyek akár érintkezéssel, akár érintkezés nélkül képesek egy választott nagyságú felület térbeli érdességi paramétereinek meghatározására. A kétdimenziós érdességi paraméterekkel analóg módon itt is beszélhetünk felületi átlagos érdességről,  $S_a$  [6]:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (4)$$

illetve a kétdimenziós  $R_z$  értéknek megfelelő  $S_z$  értékről, amely nem csupán 5 csúcs és 5 völgy adatait használja fel, hanem a teljes felület csúcsait és völgyeit figyelembe veszi. A teljes vizsgált felületre vonatkoztatott hordozóhossz értékét – 6. ábra –  $S_{mr}$ , vagy  $S_{mc}$  jelekkel jelöljük, attól függően, hogy a legmagasabb csúcstól mérve adott mélységben adjuk meg az anyaghányadot ( $S_{mr}$ ), vagy egy adott anyaghányadhoz tartozóan vizsgáljuk, hogy azt az értéket milyen mélységben éri el ( $S_{mc}$ ).

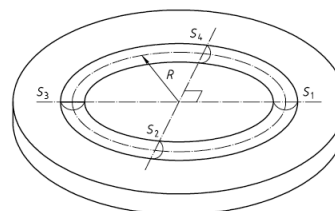


6. ábra. A térbeli hordozóhossz értékek [6]

## 2.2. A kikopott felületek érdességének jellemzése

A [7] szabvány kerámiákra vonatkozó pin-on-disc vagy ball-on-disc vizsgálatok esetén érvényes kopási tényező meghatározási módszere szerint a vizsgálat során a kikopott kopásnyom térfogatát kell meghatározni érdességmérő berendezés segítségével. A szabvány elsősorban a kétdimenziós érdességmérési módszerre vonatkozóan tartalmaz információt.

Kétdimenziós érdességmérés segítségével a kopásnyom 4 különböző sugárirányú metszetében – lehetőleg egymással  $90^\circ$ -os szöget bezáró, a vizsgált felületre merőleges síkmetszetekben kell lemérni a kopási kráter jellemzőit a 7. ábrán feltüntetett módon:



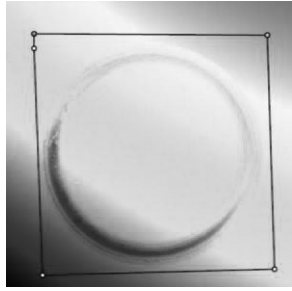
7. ábra. A kopásnyom jellemzése kétdimenziós profilométer segítségével [7]

Az  $S_1$ - $S_4$  mért felület értékeit behelyettesítve a következő egyenletbe, a tárcsa alakú próbatest kikopott térfogatát kapjuk:

$$V_W = \frac{\pi \cdot R \cdot (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)}{2}, [mm^3] \quad (5)$$

Az ellentest, vagyis jelen esetben a golyó kopásának meghatározásához nem szükséges a kikopott felület érdességének meghatározása, elegendő egy mikroszkópi méretvétel a keletkezett ellipszis két átlója hosszának meghatározásához.

A szabvány ajánlásain túlmenően a háromdimenziós érdességmérő berendezés kiértékelő szoftvere alkalmas a teljes kikopott felület egyidejű kiértékelésére, megadva ezzel az adott felületen belül található, a felbontásnak megfelelő összes érdességi völgy térfogatát. Ez egyrészt pontosabb mérést tesz lehetővé, hiszen míg a kétdimenziós profilok segítségével mindössze 4 helyen mérjük meg a kopási kráter jellemzőit, addig a teljes felület elemzésével a kopási kráter teljes egészére vonatkozóan kapunk információt. A mérés pontatlansága is ebből az előnyből ered, hiszen a kiértékelés során nem tudjuk pontosan a kopásnyomot megadni, hanem egy négyzetes felületet jelölünk ki – 8. ábra –, amelyen belül található összes mélyedés térfogatát számítja a szoftver, nemcsak a kopásnyom mélyedését.

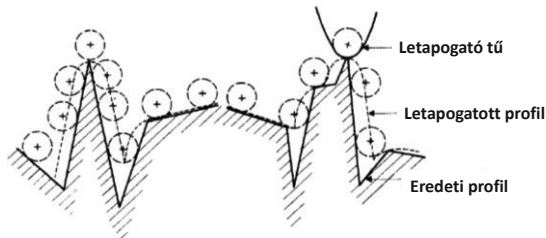


8. ábra. A kopásnyom jellemzése háromdimenziós érdességmérő segítségével

Ezen túlmenően, míg a kétdimenziós mérés esetén meg tudjuk adni azt a referencia vonalat, amely a kiinduló felületet reprezentálja, addig a háromdimenziós mérés során a szoftver automatikusan választja ki az eredeti felszín referenciasíkját.

A módszer előnye továbbá, hogy a szoftveres mérés megadja a vizsgált felületen található legmélyebb pont adatait, amit kétdimenziós profilométer használatakor csak kicsiny valószínűséggel találunk meg.

A háromdimenziós érdességmérés további előnye, különösen, ha nem érintkező módon végezzük a vizsgálatot, hogy gyakorlatilag bármely kis átmérővel jellemezhető érdességi völgy vizsgálható, olyan is, amely a kétdimenziós profilométer érintőtűjének lekerekítési sugara miatt eddig nem volt észlelhető, lásd 9. ábra.



9. ábra. Az érintőtűvel rendelkező profilométer letapogatósi hibája [3]

### 3. KÍSÉRLETI MUNKA

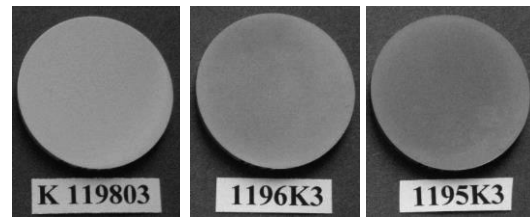
#### 3.1. Kísérleti próbatetek

A kísérleti anyagokat a Magyar Tudományos Akadémia Természettudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Kerámiák és Nanokompozitok Osztályán gyártották.

A referenciaként szolgáló monolitikus szilícium-nitrid mintán kívül kétféle, különböző mennyiségű – 1, illetve 2 térfogat % – többfalú karbon-nanocsövet (MWCNT) tartalmazó mintát (ld. 10. ábra) vizsgáltunk. A kiinduló alapanyagok pontos kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

A kiindulási porkeveréket Attritor malomban őrlötték 5 órán keresztül vízben, 3000 percenkénti fordulatszám alkalmazásával. Szárítás után 100 µm lyukméretű szitán átszitálták. A porok formázása 200 MPa nyomáson,

hidegpreléssel történt. A szinterelést 1700 °C-on, 20 MPa nyomáson, nitrogén gázban végezték, 3 órán keresztül.



10. ábra. A vizsgált próbatetek (balról jobbra növekvő MWCNT tartalommal)

1. táblázat: A minták kémiai összetétele

Próba testek	Kémiai összetétel			
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (tf %)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (tf %)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (tf %)	C-nanocső (tf %)
0% MWCNT	90	4	6	0
1% MWCNT	89	4	6	1
2% MWCNT	88	4	6	2

A próbatetek felületét saját program szerint 5 lépésben készítettük elő a kopásvizsgálatokhoz [8]. A felület előkészítés a durva csiszolástól kezdve a nanokompozitoknál szükséges néhány század mikron szemcseméretű szuszpenzióval végzett polírozásig terjedt.

#### 3.2. Vizsgálati módszerek

A próbatetekeken végzett vizsgálatok körét alapvetően két csoportra oszthatjuk: érdességi vizsgálatok, illetve tribológiai vizsgálatok. Az érdességi vizsgálatokat szintén két részre oszthatjuk: az elméleti megfontolások fejezetben tett megállapításoknak megfelelően érdességi vizsgálatokat végeztünk a kiinduló felületeken, illetve a koptatott felületeken.

A kiinduló felületeken 3-3 db, 3 mm hosszúságú profilt vettünk fel AltiSurf típusú konfokális háromdimenziós érdességmérő berendezés segítségével. A profilokhoz tartozó kétdimenziós érdességi mérőszámokat a mérőeszköz szoftvere segítségével számítottuk. Elemzéseink során az R<sub>a</sub> átlagos érdesség, az R<sub>z</sub> 10 pont magasság, illetve az R<sub>mr</sub> hordozóhossz értékeit vettük figyelembe.

Ezen túlmenően egy 2 mm × 2 mm-es nagyságú területen a felületek háromdimenziós felületi érdességi paramétereit is vizsgáltuk, és szoftveresen meghatároztuk az S<sub>a</sub>, átlagos érdesség, az S<sub>z</sub>, „maximális érdesség” és az S<sub>mr</sub>, hordozóhossz értékeket.

A koptatott felületek érdességi vizsgálatát szintén a háromdimenziós vizsgálatra alkalmas AltiSurf érdességmérő berendezés konfokális letapogató opciójával végeztük el, többféle módszert alkalmazva. A felület letapogatását követően egyrészt szoftveresen kiértékeljük a felületi bemélyedések összegzett értékét, ahogyan azt a 8. ábra szemlélteti, majd ennek

segítségével számítottuk a kikopott térfogat nagyságát. Másrészt a [7] szabványnak megfelelően 4 helyen meghatároztuk a kopásnyomok kétdimenziós profilját, majd ebből a kikopott térfogat értékét az (5) egyenletnek megfelelően. A minél pontosabb eredmények, valamint a két-, illetve háromdimenziós mérés jobb összehasonlíthatósága érdekében további 4 helyen is mértünk kétdimenziós profil-metszetet a kopásnyomban, és ebből is számítottunk kikopott térfogat értékeket.

A megfelelően előkészített felületeket pin-on-disc eljárással koptattuk. A vizsgálat során alkalmazott berendezés egy CETR-UNMT 1 típusú multifunkcionális mikro-nano felületvizsgáló berendezés volt. A vizsgálat paraméterei:

- ellentest: SiC golyó,  $r = 5,545$  mm;
- alkalmazott terhelőerő: 40 N;
- vizsgálati sebesség: 100 mm/s = 318 ford/perc;
- vizsgálati úthossz: 100 m;
- a kopásnyom sugara: 3 mm;
- laborkörülmények:  
szobahőmérséklet, 50% relatív páratartalom.

Mindhárom összetétel esetén 3-3 tribológiai mérést végeztünk a fenti paraméterekkel.

### 3.3. Vizsgálati eredmények

A próbatestek kiindulási állapotát a 2. táblázatban közölt három különböző kétdimenziós érdességi paraméterrel jellemeztük. A feltüntetett értékek három mérés átlagát képviselik.

2. táblázat. A kétdimenziós érdességi jellemzők kiinduló értékei

MWCNT tartalom	$R_a$ , nm	$R_z$ , nm	P, $\mu\text{m}$ , ha $R_{mr}=50\%$	P, $\mu\text{m}$ , ha $R_{mr}=100\%$
0 %	13,95	82,8	0,24	0,39
1 %	22	151,71	0,61	0,90
2 %	28	162,42	0,37	0,62

A kétdimenziós érdességi paraméterek kiinduló értékei alapján megállapítható, hogy a hagyományos érdességi paraméterek – vagyis az  $R_a$  és az  $R_z$  értékek – a karbon- nanocső tartalom növekedésével növekvő tendenciát mutatnak. Az érdességi paraméterek számszerű értékei alapján a felület előkészítés sikeresnek minősíthető, így a pin-on-disc elvű tribológiai vizsgálatok elvégezhetőek a próbatestek előkészített felületén. A hordozóhosszra vonatkozó érték, vagyis az a P mélység, ahol az anyaghányad 50, illetve 100%, az 1% karbon-nanocsövet tartalmazó minta esetében növekszik, és ismételt csökkenést mutat a 2% karbon-nanocsövet tartalmazó minta esetében. A hordozóhossz értékek tekintetében ugyanerre a következtetésre jutnánk, ha az adott mélységben az anyaghányad értékeket hasonlítanánk össze.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az 1% karbon-nanocsövet tartalmazó mintán a felület előkészítést követően mélyebb anyag-folytonossági hiányok maradtak vissza, mint a másik két minta esetében. Mivel a felület előkészítés különböző lépései abrazív tribológiai igénybevételt valósítanak meg, így ennek a jelenségnek a fellépésére a tribológiai vizsgálatoknál is számítani lehet.

A háromdimenziós mérések során a kétdimenziós mérőszámoknak megfelelően érdességi paraméter értékeket határoztuk meg. Ennek megfelelően a 2. táblázatban megadott jellemzők háromdimenziós értékeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Háromdimenziós érdességi jellemzők kiinduló értékei

MWCNT tartalom	$S_a$ , $\mu\text{m}$	$S_z$ , $\mu\text{m}$	$S_{mc}$ , $\mu\text{m}$ , ha $S_{mr}=50\%$	$S_{mc}$ , $\mu\text{m}$ , ha $S_{mr}=100\%$
0 %	1,94	23,24	0,0069	8,1851
1 %	4,6	26,92	0,0571	13,1657
2 %	1,92	81,71	0,2316	7,3794

A táblázat eredményeiből megállapítható, hogy míg az  $S_z$  érdességi illetve a 100% anyaghányadhoz tartozó  $S_{mc}$  mélységi értékek hasonló tendenciát mutatnak, mint a kétdimenziós esetben, addig az  $S_a$  átlagos érdességi paraméter eltérő módon változik, vagyis háromdimenziós jellemzőskor a karbon-nanocső 1%-os mennyisége az adalékolatlan mintához képest rontja, a 2% MWCNT hozzáadása javítja a felületi érdességet. A hordozófelületet jellemző paraméterek közül az 50% anyaghányadhoz tartozó  $S_{mc}$  mélység szintén növekvő tendenciát jelez a karbon nanocső tartalom növekedésével. Ez a mérési eredmény nem feltétlenül mond ellent a korábbi állításnak, miszerint az 1% karbon-nanocső tartalmú minta a felület előkészítést követően élesebb és mélyebb kitöredezéseket tartalmaz a felületén, mint a 2% MWCNT tartalmú. Elemezve ugyanis az  $S_{mr}=100\%$  anyaghányadhoz tartozó  $S_{mc}$  mélységi értékeket ismét megállapítható, hogy az 1% karbon-nanocső tartalmú minta éri el a legnagyobb mélységben a 100% anyaghányad értékét.

A kiinduló két és háromdimenziós érdességi paraméterek meghatározása alapján a következő megállapítások tehetők, illetve a következő kérdések merülnek fel:

- A hagyományos  $R_a$  és  $R_z$  értékek megfelelő érdességi mérőszámnak bizonyulnak a felületelőkészítés hatékonyságának jellemzésére és annak eldöntésére, hogy a nanokompozit kerámiákon végzendő további mikro-nano felületvizsgálatok (tribológiai vizsgálat, keménységmérés, törési szívósság vizsgálat) az érdesség, mint befolyásoló paraméter hatása nélkül kivitelezhető-e?
- A kétdimenziós hordozóhossz értékeknek a tribológiai vizsgálatok során van jelentőségük. A korábbi vizsgálati tapasztalatok alapján

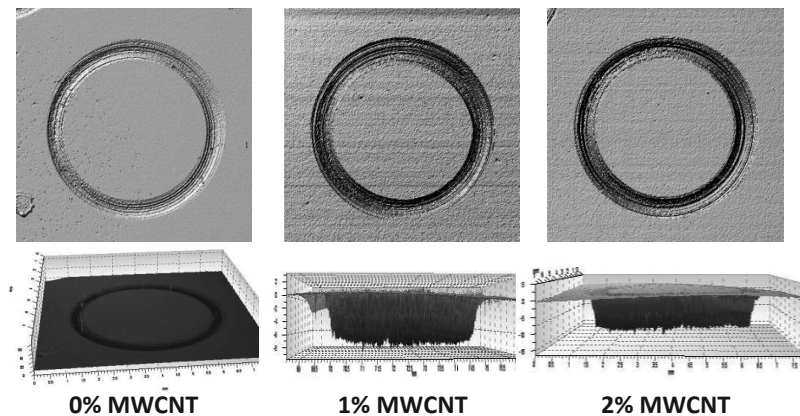
feltételeztük, hogy a tribológiai vizsgálati eredmények, elsősorban a kopási tényező valamint az érdességi mérőszámok között valamilyen korrelációs kapcsolatot fedezhetünk fel. A kérdés ebben az esetben az volt, hogy mely érdességi paraméter változása hozható leginkább kapcsolatba a kopási tényező értékekkel.

- A háromdimenziós érdességi paraméterek közül a leggyakrabban használt  $S_a$  mérőszám esetén az anyagösszetétel és az érdességi mérőszám közötti kapcsolat változása nem egyezik meg a kétdimenziós mérési eredmények által mutatott tendenciával. Így felmerül a kérdés, hogy mely vizsgálati eredmény a megbízhatóbb: a régen bevált kétdimenziós érdességi paraméter, vagy az újszerűnek tekinthető felületre kiterjedő háromdimenziós érdességi paraméter?
- Első közelítésben megállapítható, hogy a háromdimenziós érdességi paraméterek bizonyos szempontból pontosabb mérési eredménynek tekinthetők, hiszen nagyobb kiterjedésű területről adnak információt és ez az információ nemcsak

egy-egy profil-vonal szélességre vonatkozik, hanem a teljes felületen felvett profilseregre.

- Az  $S_{mc}$  értékek a teljes letapogatott felületre vonatkozóan adják meg a felületen mért legnagyobb csúcstól az anyag belseje felé, az érdességi völgy felé indulva az adott anyaghányadhoz, azaz hordozófelülethez tartozó mélység értékét. Ez a mérési módszer azon hibához vezethet, hogy a felületen található egyetlen magasabb – akár szennyeződésből származó – érdességi csúcs a teljes mérési eredményt befolyásolhatja. Ebből is következik, hogy a két-, illetve a háromdimenziós érdességi paraméterek az adott anyaghányadhoz tartozó mélység tekintetében nagymértékben eltérnek.

A kiinduló érdességi paramétereken túlmenően ugyancsak két- illetve háromdimenziós érdességmérés segítségével jellemeztük a pin-on-disc vizsgálatok során létrejött kopásnyomokat. A különböző mintákon kapott jellemző kopásnyomok háromdimenziós felvételeit a 11. ábra mutatja.



11. ábra. A három különböző összetételű próbatest egy-egy jellemző kopásnyoma

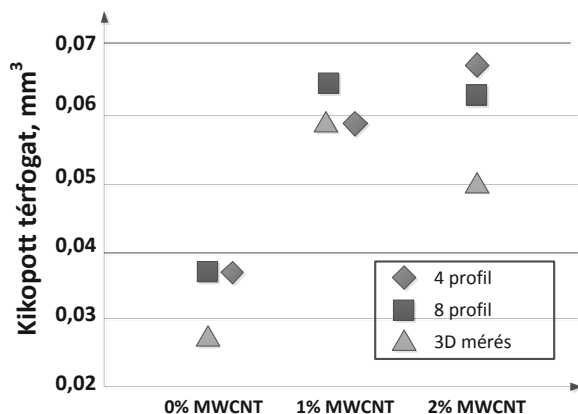
A kopásnyomokból kikopott anyag térfogatának meghatározását a 3.2 fejezetben foglaltaknak megfelelően három különböző módon végeztük el. A

kikopott térfogat értékeket és azok statisztikai elemzését a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. A különböző módszerekkel meghatározott kikopott térfogat értékek

MWCNT tartalom	Kikopott térfogat 4 mérésből, mm <sup>3</sup>			Kikopott térfogat 8 mérésből, mm <sup>3</sup>			Kikopott térfogat 3D mérés alapján, mm <sup>3</sup>				
	átlag	szórás	var.	átlag	szórás	var.	mért	átlag	szórás	var.	
0%	0,037	0,003	8,49	0,035	0,003	8,71	0,025				
	0,037	0,003	9,00	0,035	0,003	8,28	0,027	0,027	0,002	7,11	
	0,035	0,002	6,10	0,038	0,004	10,38	0,029				
1%	0,060	0,009	15,21	0,059	0,011	18,91	0,05				
	0,046	0,002	5,08	0,052	0,011	21,62	0,04	0,06	0,013	23,10	
	0,069	0,011	16,74	0,082	0,022	26,92	0,07				
2%	0,058	0,006	9,65	0,055	0,007	12,14	0,04				
	0,068	0,002	3,19	0,063	0,006	8,93	0,05	0,05	0,006	12,61	
	0,071	0,003	4,81	0,073	0,007	9,23	0,06				

A három különböző elemzési módszernek köszönhetően három különböző eredményesorozatot kaptunk. Az átlageredmények alakulását a 12. ábrán bemutatott diagram szemlélteti. Az ábra alapján megállapítható, hogy a 8 profilból és a háromdimenziós mérésből kapott kikopott térfogat eredmények alakulása hasonló tendenciát követ a kiértékelés során a három összetételre vonatkozóan, míg a szabvány szerint előírt 4 profilból történő elemzés tendenciája teljesen eltérő.



12. ábra. A három különböző összetételű minta kikopott térfogat értékei különböző módszerrel meghatározva

A három különböző mérőszám kapcsán ismét felmerül a kérdés, hogy melyik közelíti legjobban a valóságos helyzetet, melyik mérőszám adja a legmegbízhatóbb eredményeket?

Megállapítások, illetve kérdések a kikopott térfogat érdességméréssel történő meghatározására vonatkozóan:

- A kerámiák kopásvizsgálatára vonatkozó ISO 20808-as szabvány [7] rendelkezései szerint 4 db kétdimenziós profil alapján számított kikopott térfogat értékek megfelelő eredményt adnak a teljes kopásnyom vonatkozásában.
- Ha kétszer annyi kétdimenziós profilt elemzünk, feltételezhetjük, hogy ha nem is kétszer pontosabb, de pontosabb eredményt kapunk, mint a 4 mérésből nyert kikopott térfogat adatok.
- A 4 illetve 8 profil méréséből nyert eredményeket t-próbával összehasonlítva az egyes mintákra külön-külön azt a megállapítást tehetjük, hogy a mérési eredmények között nincs szignifikáns eltérés az adott ( $\varepsilon/2=0,05$ ) szignifikancia szinten. A statisztikai elemzésen túlmenően, az összetétel függvényében a mérőszámokat elemezve mégis feltűnik egy különbség. Míg a 4 profilból mért kikopott térfogat adatok folyamatosan növekvő értékeket képviselnek a C-nanocső tartalom növekedésével, addig a 8 profilt elemző vizsgálat során a 2% C-nanocsövet tartalmazó minta esetében a kikopott térfogat értéke

javulást mutat. Ez az eltérés szignifikáns különbség lehet, összevetve a kiinduló érdességi adatokkal, amelyek a kopási folyamatot nagymértékben befolyásolják.

- Továbbmelve, a 4, illetve a 8 db profilból számított átlageredmény alapján meghatározható kikopott térfogat értékeknél jóval pontosabb eredményt várhatunk a háromdimenziós érdességméréstől, amely nagyszámú profil figyelembevételével és kiértékelésével adja meg a kikopott térfogat értékét. A mérés problematikája, illetve határozatlan nagyságú pontatlansága – ahogyan arra korábban utaltunk –, abból ered, hogy egy adott terület (ld. 8. ábra) letapogatása után a kikopott térfogat értékét egy olyan bázisfelülethez viszonyítva számítja, amelyet a szoftver határoz meg, vagyis az a felület, ami eredetileg a minta felszínét képezte nem jelölhető ki manuálisan, mint referenci felület. A mérés pontatlanságának másik oka, hogy a szoftver által kiválasztott felszín alatti mélyedések, ún. érdességi völgyek nem csupán a kopásnyomba eső területek lehetnek, hanem a kopásnyomon kívül eső érdességi völgyek térfogatát is beleszámolja, ezzel növelve a kikopott térfogat értékét.
- Matematikai statisztikai elemzés, t-próba segítségével megállapítható, hogy a háromdimenziós mérési eredmények és a 4, illetve 8 profilból meghatározott kikopott térfogat értékek között a monolitikus és a 2% karbon-nanocső tartalmú minta esetében szignifikáns az eltérés az adott ( $\varepsilon/2=0,05$ ) szignifikancia szinten, míg az 1% karbon-nanocső tartalmú minta esetében mindhárom mérési eredmény összevonható egy mintába, tehát közöttük az eltérés nem szignifikáns.
- A kikopott térfogat mért értékei alapján összefoglalóan megállapítható, hogy feltehetően a háromdimenziós érdességmérési vizsgálati módszer adja a legmegbízhatóbb eredményeket, ugyanakkor nem tudjuk számszerűsíteni a háromdimenziós mérés fent említett bizonytalanságából adódó hiba nagyságát. A mérési eredmények alapján viszont megállapítható, hogy a 4 profilból kétdimenziós méréssel meghatározott kikopott térfogat értékek kevésbé jellemzik a valós állapotot, így a szabvány által előírtakhoz képest eltérő mennyiségű, legalább kétszer annyi mérési ponton felvett kétdimenziós profil használata javasolható, mivel az így számított eredmények már jóval pontosabb eredményt szolgáltatnak. Bizonyíték erre a 8 profilból és a háromdimenziós mérésekből származó eredmények azonos tendenciája a különböző mintaösszetételek esetén.

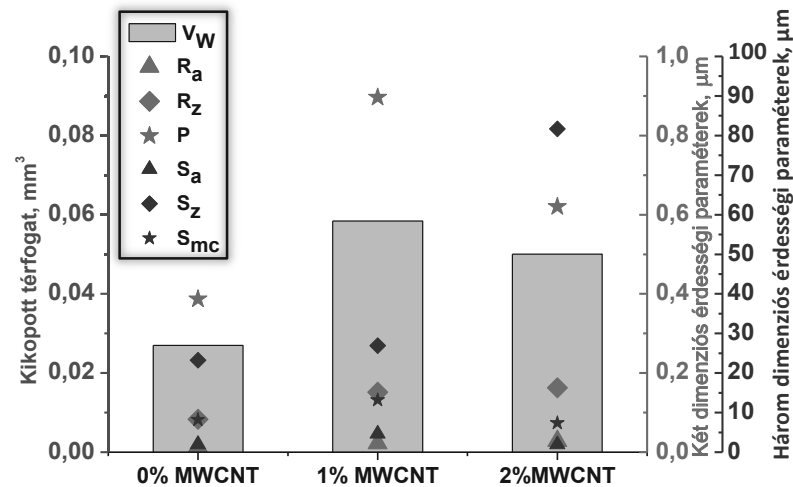
Az elvégzett elméleti és gyakorlati kísérleti munka további fontos kérdése, hogy a pin-on-disc

vizsgálatokkal meghatározott kikopott térfogat értékek, amelyek az adott anyagminőség tribológiai viselkedését jellemzik, melyik kiinduló érdességi mérőszámmal hozhatók kapcsolatba.

A kiinduló érdességi mérőszámok és a kikopott térfogat értékek közötti összefüggést a 13. ábra illusztrálja. A kikopott térfogat értékek elemzésekor a fenti megfontolások alapján a háromdimenziós értékeket vettük alapul. Ehhez hasonló tendenciát kaptunk volna a különböző anyagminőségek esetén,

ha a 8 profil mérésével kapott eredményeket használjuk, a 4 profilból számított eredményeket – amelyek egészen eltérő tendenciát mutattak – már az előző elemzéskor sem ítéltük kellően megbízhatónak.

A 13. ábrán a kétdimenziós érdességi paraméterek közül a mélység (P) értékét csak a 100% anyaghányadnál tüntettük fel. Ennek megfelelően a háromdimenziós eredmények közül is csak a 100% anyaghányadhoz tartozó  $S_{mc}$  értékeket ábrázoltuk.



13. ábra. A kikopott térfogat értékek és a kiinduló érdességi értékek közötti kapcsolat

A 13. ábrán látható eredmények alapján egyértelmű kapcsolat fedezhető fel a kikopott térfogat értékek és a 100%-os anyaghányadhoz, azaz hordozóhosszhoz tartozó mélység értékek között. A további érdességi paraméterek közül az  $R_z$  és  $S_z$  értékek illetve a kikopott térfogat között összefüggés nem mutatkozik a vizsgált anyag esetében, míg az átlagos érdességi paraméterek esetében a háromdimenziós  $S_a$  értékek ismét hasonló tendenciát mutatnak, mint a kikopott térfogat értékek. Ezen eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy míg az átlagos ( $R_a$ ,  $S_a$ ), illetve a maximális érdességi értékek ( $R_z$ ,  $S_z$ ) megfelelő mérőszámnak bizonyultak a vizsgálandó felület előkészítésének megfelelőségére vonatkozóan, addig a tribológiai viselkedés és a hordozóhossz mérőszámok (P,  $S_{mc}$ ) között egyértelmű kapcsolat áll fenn, így a tribológiai viselkedést ezen mérőszámok jól jellemzik.

A kapott eredmények fizikai hátterét elemezve a vizsgálati eredmények nem meglepőek, hiszen a kopás szempontjából mérvadó felület az egymáson elcsúszó darabok valóságos érintkezési felülete, amely fizikailag egyértelműen a hordozóhossz nagyságával jellemezhető.

#### 4. ÖSSZEGZÉS

A cikkben bemutatott kutatási munka keretében 1 és 2 tf% mennyiségű többfalú karbon nanocsővel erősített (MWCNT) szilícium-nitrid kerámia

kompozitok, valamint azonos mátrixösszetételű erősítetlen kerámia érdességi és tribológiai vizsgálatát végeztük el. A vizsgálat sorozat célja annak megállapítása volt, hogy az érdességmérés, mint vizsgálati technika milyen módon képes a kerámiák tribológiai vizsgálatait kiegészíteni. Ennek érdekében megmértük a vizsgálati mintadarabok kiinduló két- illetve háromdimenziós érdességi paramétereit ( $R_a$ - $S_a$ ,  $R_z$ - $S_z$ , P- $S_{mc}$  adott anyaghányad értékeknél), illetve a tribológiai vizsgálatot követően a kikopott térfogat értékét is érdességmérő berendezés segítségével határoztuk meg, különböző módszereket alkalmazva.

Az adott kerámia nanokompoziton végzett tribológiai és érdességi vizsgálatok alapján az alábbi megállapítások tehetőek, illetve az alábbi kérdések, problémák felvetése indokolt:

- A hagyományos módon meghatározott és legelterjedtebben használt  $R_a$  és  $R_z$  értékek megfelelő érdességi mérőszámnak bizonyulnak a felület előkészítés hatékonyságának megállapítására.
- Ezzel kapcsolatban kérdésként fogalmazható meg, hogy amennyiben a kétdimenziós mérőszámok helyett a háromdimenziós jellemzőket használjuk, található-e a hagyományos kétdimenziós érdességi paraméterek ( $R_a$ ,  $R_z$ ) és a háromdimenziós érdességi paraméterek ( $S_a$ ,  $S_z$ ) között számszerű összefüggés? Melyik mérőszám tekinthető



*megbízhatóbbnak a néhány profil alapján a nm-es tartományba eső kétdimenziós értékek, vagy az adott felületen nagyszámú profilt figyelembe vevő, de a durvább, μm-es tartományba eső háromdimenziós értékek? A háromdimenziós mérőszámok bevezetése és használata során ezt az objektív körülményt – amely nagyságrendi eltérést eredményez a felület jellemzésére használt mérőszámokban – feltétlenül és körültekintően figyelembe kell venni.*

- A hordozóhosszat, azaz az érintkezési felületet képviselő anyaghányadot jellemző két- és háromdimenziós mérőszámok ( $P$ ,  $S_{mc}$ ) megbízhatóságára vonatkozóan a kétdimenziós mérési eredményeket azért tekinthetjük mérvadóbbnak, mert azok egy-egy statisztikailag véletlenszerűen kiválasztott profil alapján jellemzik a felületet. Ezzel szemben a háromdimenziós mérés technika a hordozóhossz számításakor nem hanyagolja el a felületen lévő egyedi geometriai anomáliákat, pl. szennyezőanyag szemcséi, stb., amelyek az alkalmazott számítási módszer – azaz egy legmagasabb csúcsra illesztett bázisfelülettől alacsonyabban fekvő pontok által képviselt ösztérfogat – esetén nagymértékben módosíthatják az eredményeket. *Az adott anyaghányadhoz tartozó mélység értékek tekintetében szintén felmerül az a kérdés, hogy létezik-e számszerű összefüggés a két- és háromdimenziós értékek között?*
- A különböző módszerekkel (4 profil, 8 profil, háromdimenziós érdességmérés) meghatározott kikopott térfogat értékek közül matematikai statisztikai elemzésekkel is alátámasztva megállapítottuk, hogy a szabvány szerinti 4 profilból történő elemzés nem elégséges. Az eredmények azonos tendenciája figyelhető meg a 8 profilból származó mérési eredmények, illetve a háromdimenziós mérési eredmények között. A kikopott térfogatok számítása tekintetében a legmegbízhatóbb mérési eredményt feltehetően a háromdimenziós mérés szolgáltatja. *Kérdésként merül fel azonban, hogy ennél a mérési technikánál hogyan tudjuk leválasztani a kopásnyomon kívüli érdességi völgyek hatását a mért értékekről, illetve mi alapján adja meg a szoftver a vizsgált felület bázisfelületét, a számítások eredményét alapvetően meghatározó referenciasíkot?*
- Kísérleti eredményeink segítségével igazoltuk, hogy a vizsgált kerámia nanokompozitok tribológiai viselkedését leginkább jellemző érdességi paraméter – mind a két-, illetve a háromdimenziós értékeket tekintve – az adott hordozóhosszhoz, anyaghányadhoz tartozó mélység ( $P$ ,  $S_{mc}$ ) értéke.

- Ennek alapján egyértelműen javasolható, hogy a kopási viselkedés jellemzésekor ne csupán a hagyományosan alkalmazott átlagos, illetve maximális érdességi paramétereket ( $R_a$ ,  $R_z$  értékeket) vegyük figyelembe, hanem a csúszópárok valóságos érintkezési felületét, jellemző, azt fizikailag egyértelműen képviselő hordozóhosszak ( $R_{mr}-S_{mr}$ ), vagy az ezzel ekvivalensen használható, az adott hordozóhossz előfordulásának mélységét jellemző ( $P-S_{mc}$ ) paraméterek értékét is.

## 5. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] B. BHUSAN: Modern Tribology Handbook, Volume One, CRC Press, ISBN 0-8493-8403-6, 2001.
- [2] KONCSIK ZS., MAROS B. M., KUZSELLA L.:  $Si_3N_4/SiC$ /grafit kerámia kompozitok mechanikai tulajdonságai, GÉP, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, LXI. évfolyam, 2010/3. pp. 10-15. ISSN 0016-8572, index: 25 343
- [3] H. DAGNALI: Exploring surface texture, Taylor Hobson Precision, England, 1998.
- [4] D. DOWSON: Experimental methods in tribology, Tribology Series, Vol. 44. ISBN 0-444-51589-5. 2004.
- [5] DIN EN ISO 4287: Geometrical product specifications (GPS) Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, 2009.
- [6] ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS) Surface texture: Areal – Part 2.: Terms, definitions and surface texture parameters, 2012.
- [7] ISO 20808: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method, 2009.
- [8] KONCSIK ZS., MAROS B. M., KUZSELLA L.:  $Si_3N_4$  kerámia kompozitok abrazív tribológiai vizsgálata, MTEKMR: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2012. Szolnok, 2012.05.10. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, ISBN 978-963-7064-28-9, pp. 217-225.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.