

Si₃N₄/SiC/GRAFIT KERÁMIA KOMPOZITOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

MECHANICAL BEHAVIOUR OF Si₃N₄/SiC/GRAPHITE CERAMIC COMPOSITES

Koncsik Zsuzsanna^{*}, Marosné Berkes Mária^{**}, Kuzsella László^{***}

ABSTRACT

Pin-on-disc tribological tests were performed on Si₃N₄/SiC/graphite ceramic composites with 5 N applied load, at room temperature in dry conditions with a contemporary measurement of the friction coefficient. Tests were completed with microhardness tests (F=10 N) and indentation fracture toughness tests (F=100 N), furthermore morphological analyses of the wear tracks by SEM have been performed. Based on SEM pictures of the wear traces the main damage mechanism could be identified as abrasive wear. For the assessment of the abrasive wear volume the Evans-Marshall lateral crack chipping model was used.

1. BEVEZETÉS

A monolitikus Si₃N₄ kerámia kiváló mechanikai tulajdonságainak köszönhetően számos műszaki alkalmazásban használatos. A Si és a N közötti kovalens kötés miatt a Si₃N₄ kerámiák gyártása nehezen oldható meg szinterelési adalék – Al₂O₃, MgO, Y₂O₃ – nélkül [1]. Ezek az oxidok elősegítik az alapanyag sűrűsödését, a porozitás csökkenését az oldódás–diffúzió–újraakiválás mechanizmusok által, de üvegfázisként megmaradnak a Si₃N₄ szemcsék hátárán, gyengítve ezáltal a mechanikai tulajdonságokat [2].

A szilícium-nitrid alapú kerámiák mechanikai teljesítőképességének javítása érdekében gyakran SiC erősítőfázist adalékolnak az alapmátrixhoz [3, 4, 5, 6, 7]. A SiC hozzáadásának módja eltérő lehet, például Niihara és szerzőtársai [8, 9] Si₃N₄/SiC kerámia nanokompozitokat készítettek Si-C-N porokból kiindulva és vizsgálataik szerint a szinterelés során keletkező kompozitok sokkal jobb mechanikai tulajdonságokat mutattak, mint a monolitikus Si₃N₄ kerámia. A mikroszerkezeti vizsgálatok szerint az alapmátrixban in-situ módon alakultak ki a SiC nanorészecskék, amelyek a mechanikai tulajdonságok javulását eredményezték.

^{*}egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

^{**}témavezető, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

^{***}egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Polimermérnöki Tanszék

Kerámia mátrixú kompozitokat egyre szélesebb körben használnak kopásnak kitett alkalmazásokban.

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

A cikk fő témája új fejlesztésű Si₃N₄/SiC/grafit kerámia kompozitok tribológiai viselkedésének vizsgálata. A kutatások fő célja volt a tribológiai jellemzők (kopási tényező, kopási mechanizmus, súrlódási együttható) és más mechanikai tulajdonságok (keménység, törési szívósság), illetve a változatos mikroszerkezeti sajátosságok (a másodlagos fázis szemcsemérete és mennyisége) közötti korrelációs kapcsolat vizsgálata.

A tribológiai vizsgálatokat pin-on-disc elvű tribometer alkalmazásával végeztük el, a súrlódási együttható on-line rögzítésével. A kopásvizsgálatokat kiegészítettük hagyományos microVickers-keménység-méréssel, illetve a kopásnyomok morfológiai elemzéséhez pásztázó elektron-mikroszkópot használtunk.

2. KÍSÉRLETI MUNKA

2.1. Kísérleti próbatetek

A kísérleti anyagokat a pozsonyi Szlovák Tudományos Akadémia Szeretlen Kémiai Intézete gyártotta. A gyártásához E10 osztályú Si₃N₄ port használtak, Y₂O₃ szinterelési adalékkal. A kiinduló porkeverék pontos kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

Az alapanyagokat 1750 °C-on melegen sajtolták karbon formába 30 MPa nyomással és 0,2 bar nitrogén túlnyomással [10]. A szinterelés során a grafit részecskék, a szinterelési adalék és az alapanyag között lejátszódott kémiai reakciók számos új fázis kialakulását teszik lehetővé. A vizsgált esetekben többek között intra- és intergranuláris SiC szemcsék képződtek, illetve különféle oxidok, oxi-nitridek és karbo-nitridek keletkeztek. Ezzel a gyártási eljárással tehát in-situ módon erősített Si₃N₄ alapú kerámia kompozit készíthető.

1. táblázat. A próbatetek kémiai összetétele és a sűrűsége

Próbatest	Si ₃ N ₄ [*] [tf%]	Y ₂ O ₃ [tf%]	Grafit		Sűrűség [g/cm ³]
			Tartalom [tf%]	Szemcseméret [μm]	
G1	93,1	4,9	2	< 25	3,246
G2	90,3	4,7	5	< 25	3,239
G3	85,5	4,5	10	< 25	2,494
G4	85,5	4,5	10	< 71	2,822
G5	85,5	4,5	10	<125	3,141
G6	85,5	4,5	10	> 125	3,090

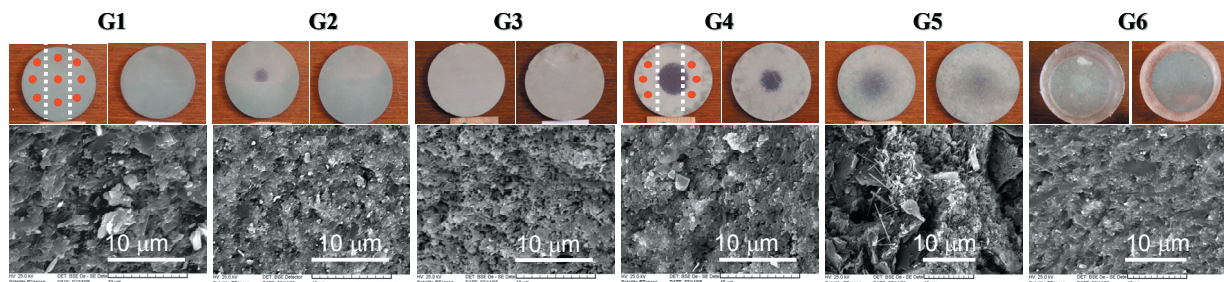
* UBE Industries, Ltd., Japan, SN-E10

Az eredeti tárcsa alakú ($\phi = 47$ mm átmérőjű, $h = 3$ mm magasságú) próbatetek fényképét az 1. ábra mutatja. A tribometer mintatartójának korlátozott méretei miatt a vizsgálati darabokat a G1 és G4 mintákon bemutatott szaggatott vonalak mentén elvágtuk. A G1 és G4 mintákon berajzolt körök a kopásnyomok elhelyezkedését jelzik.

A szinterelést követően néhány próbatest mind az átmérő és a próbatest vastagsága mentén az

1. ábrán bemutatott eltérő, sötétebb színű tartományokat tartalmazott. Ennek oka, hogy a grafitpor egyenletes elkeverése a kiinduló Si₃N₄ por alapanyagban a grafit hidrofób tulajdonságai miatt nehézkes. A G2, G4, G5 mintákon látható fekete foltok reakcióba nem lépett grafit agglomerátumok.

A próbatetek *mikroszerkezetét* a töretfelületeken, a kopásnyomok közelében vizsgáltuk. A vonatkozó anyagszerkezeti felvételek szintén az 1. ábrán láthatók.



1. ábra. A vizsgált Si₃N₄/SiC/grafit próbatetek szemközi homlokfelületei és mikroszerkezete

A különböző tartományok grafit tartalmát pásztázó elektronmikroszkópos képelemzés segítségével vizsgáltuk, a grafit agglomerátumok területi arányának becslésével. A leginkább inhomogén G4 próbatest belső régiójában a területelemzés ~3,7%-os grafit tartalmat mutatott. A grafit agglomerátumok mérete 1-5 μm között változott, míg a külső régió területelemzése ~0,5% grafit tartalmat jelzett és az agglomerátumok kiterjedése is kisebb, 1-2 μm közötti volt. A G5 minta jellemző százalékos grafit területaránya ~9,4%, a grafit agglomerátumok kiterjedése 40-100 μm között változik, míg a G6 minta ~12,9% grafitot tartalmaz, mely agglomerátumok kiterjedése 100-200 μm között változott. A grafit agglomerátumok területének elemzése révén megállapítható, hogy a kiindulási grafit adalék szemcseméretének növelésével a reakcióba nem lépett grafit agglomerátumok mérete is nő.

A röntgendiffrakciós vizsgálatok nemcsak a szabad grafit jelenlétét, hanem újonnan képződött SiC és SiCN fázisok jelenlétét is bizonyították minden mintában.

A minták inhomogenitásának elemzését és mechanikai tulajdonságra gyakorolt hatását egy korábbi publikáció [11] tartalmazza. A továbbiakban bemutatásra kerülő mechanikai vizsgálatokat a próbatetek homogén területein végeztük el.

A próbatesteket gyémánt pasztával 1 μm végső érdességig polírozták. A minták jellemző érdességi adatait a 2. táblázat tartalmazza, ahol R_z , az 5 legmagasabb és az 5 legmélyebb pont átlaga, R_a , az átlagos érdesség illetve a P mélység az adott, %-ban kifejezett t_p hordozóhossz távolságának értéke a legmagasabb csúcstól mérve.

2. táblázat. Az érdesség és hordozóhossz mélység jellemző értékei

Minta	R _z , μm		R _a , μm		P, μm [ha t _p =50%]		P, μm [ha t _p =95%]	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
G1	0,863	0,069	0,125	0,010	0,538	0,101	1,033	0,172
G2	0,836	0,070	0,121	0,005	2,337	1,122	3,438	1,624
G3	1,383	0,124	0,190	0,041	1,643	0,256	2,628	0,326
G4	1,182	0,225	0,155	0,019	0,908	0,440	1,622	0,446
G5	1,722	0,327	0,193	0,045	1,848	0,461	3,347	1,189
G6	2,717	0,457	0,439	0,070	1,583	0,567	3,907	0,691

2.2. Vizsgálati módszerek

A tribológiai vizsgálatokat nagy hőmérsékletű CSM THT-S-AX-0000 pin-on-disc tribometer [12, 13] segítségével végeztünk, a Miskolci Egyetem Polimermérnöki Tanszékén. A vizsgálatok során 6 mm átmérőjű SiC golyó szolgált ellentestként, a terhelőerő 5N volt, a csúszási úthossz 100 m, a kopásnyom sugara 1,2 mm, a kerületi sebesség 0,01 m/s. A méréseket ~50%-os relatív páratartalmú, szobahőmérsékletű levegőn, kenőanyag alkalmazása nélkül, a DIN 50324 szabvány előírásainak megfelelően végeztük [13], három párhuzamos méréssel.

A k , kopási tényező értékének kiszámítása a szabványban [12, 13] rögzített összefüggés alapján, a következő egyenlettel történt:

$$k = \frac{V_w}{L \cdot F_N} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right], \quad (1)$$

ahol V_w a kikopott térfogat [mm³], L a teljes csúszási úthossz [m], F_N az alkalmazott normálirányú terhelőerő [N].

A *microVickers keménységet* 10 N terhelőerővel mértük. A lenyomatokat részben az elvágott próbatestek húrja mentén (minden mintán 10-10 lenyomat), illetve a pontosabb értékelés és a lokális információnyerés érdekében a kopásnyomok közepén helyeztük el (próbatestenként 5-5 lenyomat).

A *Vickers lenyomatos törési szívósságot* 100 N terhelőerő alkalmazásával határoztuk meg. Minden próbatesten 10-10 lenyomat alapján a Shetty-féle kiértékelési módszert [14] alkalmazva számítottuk a K_C törési szívósság (2) összefüggés szerinti értékét:

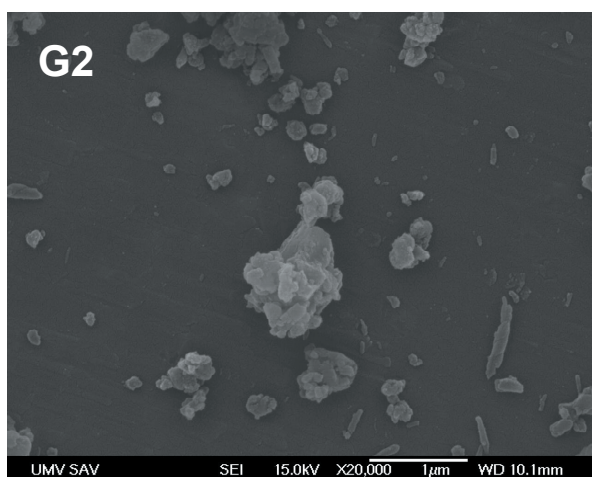
$$K_c = \beta \cdot (HV \cdot F_N)^{1/2} \cdot a^{-1/2} \left[MPa \cdot \sqrt{m} \right], \quad (2)$$

ahol, $\beta = 8,89 \cdot 10^{-2}$ empirikus konstans, HV a *microVickers keménység* érték, és a a lenyomat fél átlójának hossza.

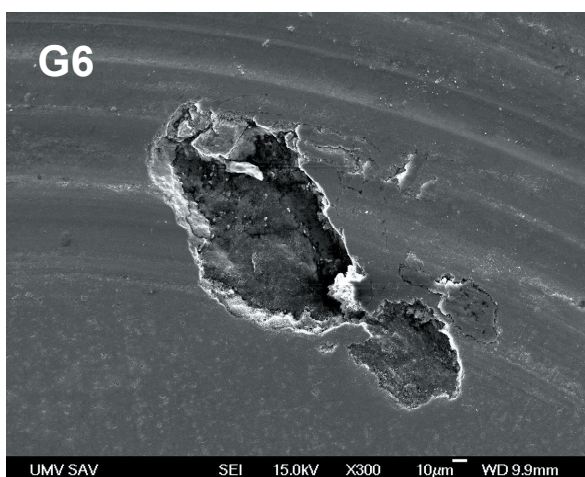
2.3. Vizsgálati eredmények

A tribológiai vizsgálatok legfontosabb eredményeit, azaz a kopási tényezőket, a súrlódási együtthatókat értékét, továbbá a kopási mechanizmusok elemzését a [11,15] munkákban publikáltuk.

A következőkben azokra a tribológiai vizsgálati eredményekre koncentrálunk, ahol abrázív kopási mechanizmussal játszódik le a kopási folyamat. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a kicsiny, 5 N terhelőerővel végzett vizsgálatok során abrázív kopási mechanizmus uralkodik a száraz csúszósúrlódásban résztvevő felületek között, ahogyan ezt a 2. ábra is bizonyítja.



a)



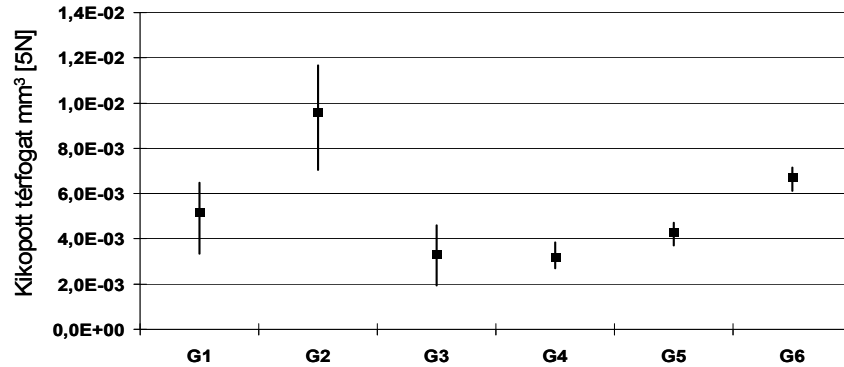
b)

2. ábra. a) Abrázívan kikopott részecskék a G2 minta 5 N-os kopásnyomában
b) Abrázív kitöredezés a G6 szemcse 5 N-os kopásnyomában

A vizsgálat során meghatározott, a 3. ábrán illusztrált kikopott térfogat értékek mind a hat minta esetében a gyenge kopás tartományába esnek ($V_w = 10^{-2} - 10^{-3} \text{ mm}^3$) [16]. Összehasonlítva a G1-G3 mintákat, amelyek ugyanolyan szemcseméretű, de eltérő mennyiségű kiindulási grafit adalékot tartalmaznak, a kikopott térfogat kismértékű csökkenését tapasztaljuk a grafit mennyiségének növekedésével.

A G2 minta eltérő viselkedést mutat, ezen a mintán kapott kísérleti eredmények nem illenek az előbb említett tendenciába.

A G3-G6 minta megegyező tartalmú, de eltérő szemcseméretű grafit adalékot tartalmaz. A kopásvizsgálatok azt bizonyították, hogy a kiinduláskor adalékolt grafit szemcseméretének növekedésével fokozatosan növekszik a kikopott térfogat értéke is.



Grafit	tartalom [%]	2	5	10	10	10	10
	szemcseméret [μm]	< 25	< 25	< 25	< 71	< 125	< 125
sűrűség [g/cm^3]		3.25	3.24	2.49	2.82	3.14	3.09

3. ábra. Az abrazív módon kikopott térfogat értékei a kémiai összetétel függvényében

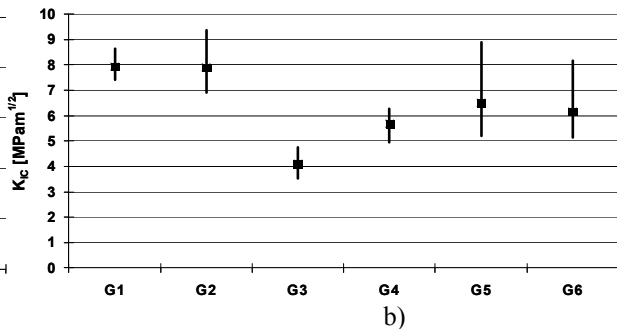
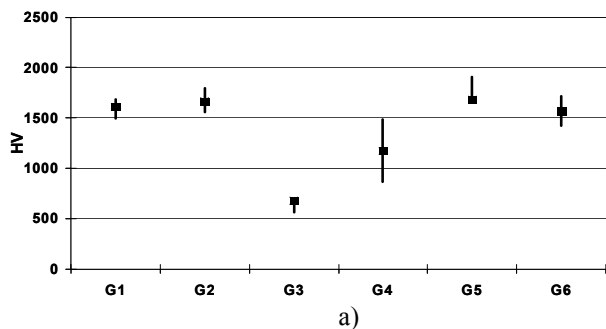
Az átlagos keménység értékei (ld. 4. ábra a) ábrarészlete) a G3 minta esetében a HVM 600-700 tartományba, a G4 minta eseté a HVM1100-1300 tartományba míg a G1, G2, G5, G6 minták esetében a HVM1500-1800 tartományba esnek.

Az Vickers lenyomatos törési szívósság átlagos értékei 4-8 MPam^{1/2} intervallumban változtak, amely megfelel a Si₃N₄ alapú kerámiák szokásos szívóssági értékének. Az egyes mintákra kapott adatokat a 4. ábra b) részlete mutatja. A törési szívósság változása az egyes próbatesteken hasonló tendenciát mutat, mint a keménységméréssel kapott eredmények.

A legmagasabb törési szívósság értékeket a G1 és G2 minták esetében mértük, a kisebb értékek pedig a nagyobb kiterjedésű szabad grafit agglomerátumokat tartalmazó próbákon fordultak elő.

A keménységi értékekhez hasonlóan a legkisebb törési szívósság értéket a G3 mintán mértük.

Az új anyagtechnológiai fejlesztésű Si₃N₄/SiC/grafit kompozitokon elvégzett mechanikai vizsgálatok célja nemcsak a vizsgált kerámia anyag szokásos szilárdsági jellemezése volt, hanem az ilyen anyagokra jellemző kopásnak kitett alkalmazásban nyújtott teljesítőképesség vizsgálata is.



4. ábra. a) A G1-G6 minták microVickers keménység értékei (10 N)
b) A G1-G6 minták Vickers-lenyomatos törési szívósság értékei (100 N)

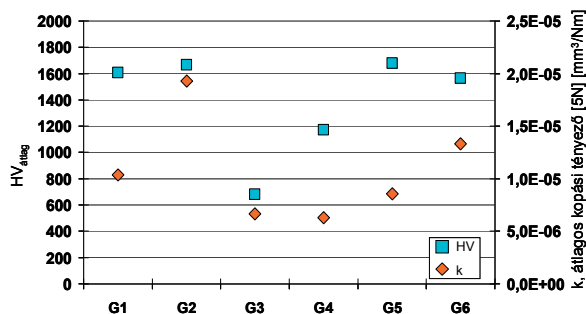
A kopás egy olyan összetett folyamat, amelyre számos befolyásoló tényező hat (érintkezési geometria, felületi

éresség, mikroszerkezet, törési szívósság, vizsgálati sebesség, terhelés, páratartalom, hőmérséklet, stb.). Jelen

kutatómunka fő célja, és hosszú távú célkitűzése egy olyan matematikai modell megalkotása, amely alkalmas a kerámia kompozit kopási viselkedésének becslésére és figyelembe veszi a legfőbb befolyásoló tényezőket.

3. A KOPÁSI VISELKEDÉS BECSLÉSE

A fémek abrazív kopása során Archard-törvényét [17] széles körben használják a kopás mértékének becslésére. Archard elméletében az anyag keménysége egyenesen arányos a kopási tényezővel. A vizsgált kerámia kompozit esetében viszont — az 5. ábrán bemutatott eredmények alapján — nincs ilyen egyértelmű korreláció a kopási tényező és a microVickers keménységértékek között, sőt a tapasztalatok szerint [18] a keménység növelése a kopási ellenállás csökkenését is okozhatja, mivel ez a ridegtörés mértékének felerősödéséhez és — az uralkodó kopási mechanizmustól függően — növekvő anyagleváláshoz vezethet. A kerámiák esetében feltehetően más anyagi sajátosságok, például törési szívósság, Young-modulus, stb. is jelentősen befolyásolják a kopási folyamatot.



5. ábra. Korreláció az átlagos microVickers keménység és az átlagos kopási tényező között

A műszaki kerámiák abrazív kopásának becslésekor a legtöbb szakirodalomban publikált modell speciálisan csak egy adott tribológiai rendszer esetére, azaz meghatározott anyagú, geometriájú és mozgásviszonyú érintkező felületek között lejátszódó kölcsönhatás jellemzésére irányul. Ezért alkalmazhatóságuk nem terjed ki széleskörűen minden anyagpárra. Ebből következik, hogy a kerámiák kopásának vizsgálatokor többnyire az adott anyagra/anyagpárra vonatkozó kísérleti eredményekkel jellemzik a kopás várható mértékét, és kevésbé alkalmazzák a matematikai modellek segítségével történő becslést [16].

Evans [19] javasolta először a műszaki kerámiák kopásának becslését a laterális repedés modell használatával, amelyet különösen forgácsolási célú felhasználáskor hasznosíthatunk. Megalkotott egy összefüggést a laterális repedések kiterjesztésével az anyagleválás modellezése érdekében, nagy nyomófeszültség esetére, a következő módon:

$$V_w = c \cdot \frac{F_N^{5/4}}{K_c^{3/4} \cdot HV^{1/2}} \cdot L, \quad [mm^3], \quad (3)$$

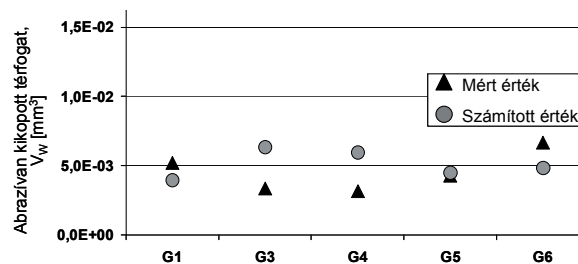
ahol c az adott kopási rendszerre meghatározható konstans, F_N a normál irányú terhelőerő N-ban, K_c a Vickers

lenyomatos törési szívósság MPa·m^{1/2}-ben, HV a Vickers keménység, L a kopási úthossz m-ben.

A Si₃N₄/SiC/grafit kerámia kompozit abrazív módon kikopott térfogatának becslésére a 3. egyenletet használtuk fel, amely kapcsolatot teremt a terhelőerő, a törési szívósság és az vizsgált kerámia keménysége között. A kopási rendszer viselkedését befolyásoló egyéb tényezők hatását — pl. az ellentest merevsége, geometriája — amelyet az összefüggés explicit módon nem vesz figyelembe, a c rendszerkonstans tartalmazza. Ennek értéke a vizsgált esetekre $c=10^{-3}$ -ra adódott.

A 3. egyenlettel becsült értékek összehasonlítva a kísérletek során mért értékekkel, jó közelítést adtak az abrazív módon kikopott térfogat becslésére, ahogyan azt a 6. ábra illusztrálja. A becslés során a kísérleti eredmények szerint is eltérően viselkedő G2-es mintát figyelmen kívül hagytuk.

Ez a kopási modell első közelítésben megfelelő közelítést ad (4±25% eltérés a mért és számított értékek között) a G1, G5, G6 minták esetében. A modell további pontosításához azonban újabb paramétereket — rugalmassági modulus, szilárdsági jellemzők, mikroszerkezeti sajátosságok, porozitás — is be kell vonni a matematikai modellbe, amelyek a kopási rendszer károsodását befolyásolják. A modell pontosítása után feltehetően a G3, G4 próbatestek esetében is jobb közelítési eredményt kapunk.



6. ábra. Mért és számított abrazívan kikopott térfogat értékek

Ezekben az esetekben további vizsgálatok szükségesek annak megállapítására, hogy ezek a sajátosságok milyen módon vehetők figyelembe a modellben. Megállapíthatjuk, hogy az Evans és Marshall által megalkotott laterális repedés modell jó közelítéssel alkalmazható a vizsgált szilícium-nitrid alapú kerámia kompozitokra is.

4. ÖSSZEGZÉS

Tribológiai, keménység és Vickers-nyomatos törési szívósság vizsgálatokat végeztünk Si₃N₄/SiC/grafit kerámia kompozitokon. Az elvégzett mechanikai vizsgálatok alapján megállapíthatjuk, hogy a kapott mérőszámok között meghatározható kapcsolat áll fenn a műszaki kerámiák esetében is, amelyek alapján az alábbi megállapítások tehetők:

A kikopott térfogat, keménység és a törési szívósság közötti kapcsolat tekintetében:

- Archard-törvénye nem érvényesül a kerámiák abrazív kopása esetében;

- A kerámia nagyobb keménysége nem előnyös a kopási tényező szempontjából;
- A törési szívósság szerepe kerámiáknál jelentős, ezért nem hagyható figyelmen kívül a kopási károsodás becslésekor, abrazív kopás során a vizsgált kerámia kompozitok esetén fordított arányban áll a kikopott térfogattal;

Az „Evans-Marshall” összefüggés Si_3N_4 kerámia kompozitok esetében is alkalmazható az abrazív kopási folyamat során kikopott anyagtérfogat számszerű becslésére. A pontosabb becslés érdekében más jellemzők bevonása a matematikai modellbe indokolt, ahogyan az Hornbogen-törvényében is megjelenik [18]. A keménység és a törési szívósság mellett a rugalmassági modulus, hajlítási modulus, mikroszerkezeti jellemzők és az anyag kémiai összetétele is jelentős szerepet játszik a kopási viselkedésben, ezen mennyiségek számszerű megjelenítése indokolt a matematikai modellekben.

A mechanikai tulajdonságokon kívül az érintkező felületek jellemzőit is célszerű figyelembe venni a modellalkotás során. A 2. táblázat és a kopási folyamat jellemzésére szolgáló paraméterek összehasonlításából megállapítható, hogy szorosabb összefüggést tapasztalunk a hordozóhossz és a kikopott térfogat értékek között, mint az általánosan használatos átlagos érdesség és kikopott térfogat között.

A tribológiai vizsgálatok során a terhelőerő növelésével más uralkodó kopási mechanizmusok jelennek meg az abrazív kopás helyett. A kísérleti munka következő fázisa $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ /grafit kerámia kompozitok képlékeny alakváltozás által kontrollált kopási mechanizmusainak tanulmányozására, és számszerű becslésére irányul.

5. SUMMARY

-Tribological, microVickers hardness and Vickers indentation fracture toughness measurements were carried out on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ /graphite ceramic composites. The results of these mechanical tests showed that the wear volume is influenced by both the hardness and toughness of the material in case of ceramics. Based on the experimental observations the following establishments can be taken relating to the connection between the wear volume, hardness and fracture toughness values:

– Archard’s-law, even its modified versions – due to involving only one material characteristic, i.e. hardness – does not hold in case of ceramics;

– Higher hardness is not advantageous from the viewpoint of wear rate in case of abrasive wear of the tested materials;

– The role of fracture toughness in case of ceramics is significant. During numerical prediction of the abrasive wear volume its effect can not be neglected. The wear volume is inversely proportional to the K_{Ic} fracture toughness, that is supported e.g. by the Evans–Marshall equation.

According to our test results for calculating the abrasive wear volume of Si_3N_4 ceramic composites the Evans–Marshall model can be adopted, too

For a more accurate estimation other parameters – for instance the Young’s modulus, bending strength, different microstructural features and chemical composition of the material, furthermore properties of the contacting surfaces – are suggested to be incorporated into the mathematical model, as it appears in Hornbogen’s-law [18].

Scanning electron microscopic investigations of the wear traces of the tested $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ /graphite ceramic composites revealed that increasing the applied load other controlling wear mechanism – e.g. plastic flow – can appear beside the abrasive wear. The future research work aims at modelling the wear process of some newly developed $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ /graphite ceramic composites in order to predict the wear rate in case of deformation controlled wear process, too.

6. FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] GRESKOVICH C, ROSOLOWSKI JH.: J. Am. Ceram. Soc. 1976;59:pp336-343.
- [2] LANGE FF: J. Am. Ceram. Soc. 1974; 57: pp84-87.
- [3] P. ŠAJGALÍK, M. HNATKO, F. LOFAJ, P. HVIZDOŠ, J. DUSZA, P. WARBICHLER, F. HOFER, R. RIEDEL, E. LECOMTE, M. J. HOFFMANN: J. Eur. Ceram. Soc. Volume 20, Issue 4, April 2000, pp453-462.
- [4] M. HNATKO, D. GALUSEK, P. ŠAJGALÍK: J. Eur. Ceram. Soc., Volume 24, Issue 2, 2004. pp189-195. 8th International Conference on Ceramic Processing
- [5] A. JALOWIECKI, J. BILL, M. FRIESS, J. MAYER, F. ALDINGER, R. RIEDEL: Nanostructured Materials, Volume 6, Issues 1-4, 1995, pp 279-282.
- [6] KINEMUCHI, T. YANAI, K. ISHIZAKI: Nanostructured Materials, Volume 9, Issues 1-8, 1997, pp 23-32.
- [7] W. DREBLER, A. GREINER, M. SEHER, R. RIEDEL: Nanostructured Materials, Vol. 6, Issues 1-4, 1995, pp 481-484.
- [8] NIIHARA K, IZAKI K, KAWAKAMI T. J. Mat. Sci. Lett. 1990; 10: 112-114.
- [9] HIRANO T, NIIHARA K. Materials Lett. 1995; 22:249-254.
- [10] M. KAŠIAROVÁ, E. RUDNAYOVÁ, J. DUSZA, M. HNATKO, P. ŠAJGALÍK, A. MERSTALLINGER, L. KUZSELLA: Some tribological properties of a carbon-derived $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ nanocomposite, Journal of the European Ceramic Society, 24 (2004) 3431-3435
- [11] ZS. KONCSIK; M. B. MAROS; L. KUZSELLA: Tribological Investigation of Si_3N_4 composites; Friction, Wear and Wear Protection, ISBN 978-3-527-32366-1, Wiley-VCH, pp: 393-401. 2009.
- [12] I. M. HUTCHINGS: Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold (Hodder Headline PLC), 1992. ISBN 0-340-56184-X
- [13] Tribologie, Prüfung von Reibung und Verschleiß, DIN 50 324, 1992.
- [14] D.K. SHETTY; I.G. WRIGHT; P. N. MINCER; A. H. CLAUER: Indentation fracture of WC-Co cermets; Journal of Material Science 20 (1985) p. 1873-1882.
- [15] ZS. KONCSIK; M. B. MAROS; L. KUZSELLA: Tribological behaviour of C-derived Si_3N_4 nanocomposites, Mat. Sci. For. Vol. 589. ISBN 0-87849-371-9, Trans Tech Publications, pp:403-408. 2008.
- [16] S. M. HSU; M. SHEN: Wear prediction of ceramics; Wear 256; 2003. pp: 867-878
- [17] J. F. ARCHARD: Contact and rubbing of flat surfaces Journal of Applied Physics, (1953) pp981-988
- [18] E. HORNBOGEN: The role of fracture toughness in the wear of metals, Wear, 33. 1975. pp: 251-259
- [19] A. G. EVANS; D. B. MARSHALL: Wear mechanisms in ceramics, in: Fundamentals of Friction and Wear of Materials; American Society of Metals, Metals Park, OH, 1980. p:439