MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

Si_3N_4 KERÁMIA NANOKOMPOZITOK TRIBOLÓGIAI VISELKEDÉSÉNEK ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

NÉMETH ALEXANDRA KITTI

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLÓGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

VADÁSZNÉ PROF. DR. BOGNÁR GABRIELLA

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

PROF. DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. MAROSNÉ DR. BERKES MÁRIA

PHD, HABILITÁLT EGYETEMI DOCENS

Miskolc, 2019.

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

elnök: **Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella,**
DSc, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem

titkár: **Dr. Koncsik Zsuzsanna**
PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem

tagok: **Dr. Kocserha István**
PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem

Prof. Dr. Dusza János
DSc, igazgató, Szlovák Tudományos Akadémia Anyagtudományi Kutatóintézet, Korszerű Anyagok és Technológiák Osztálya, PROMATECH, Kassa

Dr. Károly Zoltán
PhD, kutatócsoport vezető, MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézet, Plazmakémiai Kutatócsoport

HIVATALOS BÍRÁLÓK

Prof. Dr. Balázsi Csaba
DSc, MTA, Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Prof. Dr. Eleőd András
DSc, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

A kopási károsodások elemzése napjainkban kiemelkedő jelentőségű mérnöki feladat, mivel szinte minden műszaki berendezésben találhatók súrlódó elemek. Kopásálló alkalmazásokban (pl. gépkocsi turbófeltöltőjének forgórésze, gázturbina alkatrészek, csapágyak) elterjedten használják a kutatásaim tárgyát képező Si_3N_4 műszaki kerámiát, mivel kiváló mechanikai, termikus tulajdonságai kiemelkedő tribológiai sajátosságokkal társulnak. A Si_3N_4 alkatrészek kopásállóságának további növelése jelentős gazdasági megtakarításokkal járhat, ezért ezirányú fejlesztésük számos ipari és kutatási program célkitűzése hazánkban és világszerte egyaránt.

Ezeket a károsodási folyamatokat kontrolláló kopási mechanizmusok és azok mikroszerkezeti vonatkozásai, továbbá a kopási jellemzők és az anyagi tulajdonságok kölcsönhatásai a kopásos tönkremeneteli folyamat rendszer-jellege következtében a rendszer bármely elemének megváltozásakor módosulnak. A tribológiai tulajdonságok fizikai hátterének megismerése ezért a kopással szemben ellenálló anyagok előállítását célzó, hatékony és eredményes anyagtechnológiai módszerek kidolgozásának alapvető feltétele. A kopásállóság javítására számos eljárás – a felülettechnológiák különféle módszerei, mint például a felületi hőkezelések, felületszilárdító technológiák, vagy az anyag összetételének módosítása, például erősítő fázisok bevitele az alapmátrixba, a mátrix mikroszerkezetének módosítása, az üvegfázis összetételének vagy szerkezetének megváltoztatása stb. – használatos. Utóbbiak közül a mikro- és nanoméretű szemcsék bevitele, valamint a gyártási technológia módosítása a legígéretesebb és egyben a legintenzívebben kutatott területek a kerámiák esetén.

Az értekezésben bemutatásra kerülő kutatómunka előzményeként tudományos diákköri kutatások keretében végeztem tribológiai vizsgálatokat többrétegű grafénnal adalékolt szilícium-nitrid kompozit kerámiákon, amely kutatómunkát Országos Tudományos Diákköri Dolgozat keretében, valamint számos hazai és nemzetközi konferencián bemutattam.

Ezt követően a témában megkezdett szakmai munkámat a Miskolci Egyetem Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolájának képzési programja keretében folytattam. Doktori kutatásaim szervesen kapcsolódtak hazai és nemzetközi K+F pályázatokhoz, (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029, GINOP-2.3.4-15-2016-00004) és ösztöndíjakhoz (Új Nemzeti Kiválósági Program, Eötvös Lóránd Hallgatói Ösztöndíj) amelyek jelentős támogatást nyújtottak a kutatások korszerű eszközhátterének biztosításához, így pl. egy Magyarországon jelenleg egyedülálló – mikro-nano szintű anyagi mérőszámok meghatározására alkalmas (UNMT-1) – felületvizsgáló berendezés beszerzéséhez.

A szilícium-nitrid műszaki kerámiákat a ’60-as években kezdték intenzívebben kutatni, a belső égésű motorok fejlesztése céljából [1]. Bár ezen kutatások csak részben vezettek

eredményre, mégis ennek köszönhető, hogy ismertté vált a szilícium-nitrid kerámiák felépítése, gyártástechnológiája, illetve a gyártástechnológia és a tulajdonságok közötti kapcsolat. Mára ez a műszaki kerámia az egyik legnagyobb teljesítőképességű szerkezeti anyaggá vált, kiváló mechanikai tulajdonságainak, például nagy keménységének, szilárdságának, és ezzel egyidejűleg meglévő nagy szívósságának, kiemelkedő fáradással szembeni ellenálló képességének, rendkívül kedvező kopásállóságának, hősokkállóságának és vegyi ellenálló képességének köszönhetően [2]. A monolitikus műszaki kerámiákra általánosan jellemző, hogy ezeket a kedvező tulajdonságokat nagy hőmérsékleten is megőrzik.

Bármely anyagi tulajdonságot, így a kopással szembeni ellenállást, a kopásnak kitett igénybevétel során tanúsított viselkedést is alapvetően befolyásolja az anyag szerkezete. Ennek módosítására, és ezen keresztül a tribológiai tulajdonságok befolyásolására számos lehetőség kínálkozik.

Az optimális tribológiai teljesítőképesség céljából, például a kopásállóság javítása érdekében leginkább kompozitok formájában fejlesztik és alkalmazzák a szilícium-nitrid alapú kerámiákat [3, 4], oly módon, hogy a kopás szempontjából kedvezőtlenebb tulajdonságokat – ridegség, túlzott merevség stb. – különféle erősítő fázisok segítségével javítják. Az egyik legintenzívebben kutatott adaléktípusok a különféle C származékok, ezek közül Si_3N_4 kerámiákban a kutatások középpontjában a különféle nanocső- és grafénszerkezetek állnak.

A grafén, a szén nanoszerkezetek családjának egyik fiatal tagja, ígéretes adalékanyag a kerámia alapú kompozitok súrlódásának csökkentésére. Egyszerűen előállítható, kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, valamint könnyen eloszlatható a kerámia mátrix anyagában. A grafén tulajdonságait az anizotrópia, vagyis a tulajdonságok irányfüggése jellemzi. Ennek az anyagnak a síkokban található kötései 200× erősebbek az acélénál (szakítószilárdsága 130 GPa), Young-féle rugalmassági modulusa 0,5 TPa. A legerősebb anyag, amit valaha az emberiség létrehozott. [5]. A felsoroltakon kívül tribológiai szempontból előnyös sajátossága, hogy kis súrlódási együtthatójának köszönhetően kiváló szilárd fázisú kenőanyagként funkcionálhat. További hatása lehet kompozitokban, hogy az alapanyaggal reagálva C tartalmú új, komplex erősítőfázisok keletkezhetnek.

A tribológiai teljesítőképességet nagyban befolyásolja a gyártás során kialakuló, vagy módosuló anyagszerkezet is. Napjaink korszerű gyártástechnológiája, a szikraplazma-szinterelés alkalmas lehet olyan anyagszerkezet létrehozására a szilíciumnitrid kerámiákban, amely kedvezőbb kopási viselkedést mutat, mint amelyeket hagyományosabb szinterelési technológiákkal – például meleg izosztatikus sajtolás, melegsajtolás révén – állítottak elő [6].

Az anyagtechnológiai és gyártástechnológiai vonatkozások kutatásán túlmenően egy adott összetételű, újonnan kifejlesztett kerámia nanokompozit megjelenésekor és piaci elterjesztésekor meghatározóan fontos kutatási irányt jelent az új anyag különféle igénybevételek között elérhető teljesítőképességének feltérképezése. A mechanikai

tulajdonságok meghatározásával lehetőség nyílik a kerámia nanokompozitok minél szélesebb körű alkalmazási lehetőségeinek feltárására, ami jelen értekezés egyik célkitűzése is. Mivel a kerámiák egyik legfontosabb felhasználási területét a kopásnak kitett különféle termékek képviselik, ezért a kopási viselkedés elemzése, és a tribológiai mérőszámok vizsgálata, meghatározása egy alapvetően fontos kutatási irány.

A tribológiai viselkedés megismeréséhez, a lejátszódó folyamatok megértéséhez vezető első lépés a tribológia, mint elméleti tudomány megismerése, illetve a műszaki kerámiák tribológiai viselkedésének anyagspecifikus vonásait bemutató tudományos munkák, elemzések felkutatása és áttekintése. Ezen a területen rendkívül széles a választék mind a monolitikus [1, 7] mind a különféle II. fázissal erősített szilícium-nitrid alapú kerámia kompozitok tekintetében [8, 9, 10, 11], de rendkívül sok a nyitott kérdés is, hiszen a naponta megjelenő újabb és újabb összetételű és struktúrájú kompozitok viselkedésére vonatkozóan nincs kellő számú üzemeltetési és vizsgálati tapasztalat, ezért fontos a tudatos anyag- és technológiatervezés, továbbá egy adott feladat – pl. kopásnak kitett alkalmazás – esetén a legoptimálisabb felhasználói tulajdonságok, tulajdonságkombinációk kifejlesztése.

A kopási károsodással kapcsolatba hozható, azt leginkább tükröző anyagi mérőszámok tekintetében hasznos útmutatásul szolgálnak a kerámiák kopását leíró elméleti modellek [12, 13, 14, 15], amelyek egyértelműen jelzik a fémes anyagokhoz képest eltérő viselkedésüket és az érintett anyagi sajátosságok vonatkozásában mutatkozó különbségeket.

1.2 CÉLKITŰZÉS

Doktori munkám témája két különböző gyártástechnológiával előállított – azaz meleg izosztatikusan sajtolt (HIP) és szikraplazma szinterelt (SPS) – 1 és 3 m%-nyi többrétegű grafénnal (MLG) adalékolt Si_3N_4 nanokompozitok tribológiai viselkedésének elméleti és kísérleti vizsgálata.

Ennek során áttekintem a téma szakirodalmát, amelynek célja a vizsgált anyag szerkezetének, tulajdonságainak, gyártástechnológiájának, valamint viselkedésének bemutatása. Ezt követően ismertetem a tribológiai folyamatokat és a tanulmányozott szilícium-nitrid kerámiák jellemző kopási módjait, mechanizmusait. A kísérleti munka előkészítése céljából ugyancsak ez a fejezet foglalkozik a kerámiák tribológiai és egyéb mechanikai vizsgálatainak megismerésével és a kiértékelési lehetőségek bemutatásával.

Kísérleti kutatómunkám célja a műszaki alkalmazásokban kiemelt szerepet betöltő Si_3N_4 alapú kerámiák tribológiai teljesítőképességének vizsgálata, a kopásállóságot befolyásoló egyes anyagszerkezeti és technológiai tényezők hatásának jellemzése.

Ennek érdekében tribológiai kísérleteket hajtok végre, amelyek eredményei alapján a vizsgált szerkezeti kerámiák hatékonyabb tribológiai alkalmazását elősegítő különféle kopási térképek kidolgozását és a megfigyelt domináns kopási módokra érvényes kopási modellek

megalkotását tűzöm ki célul. A felsorolt célok eléréséhez a szakirodalmi ismeretek áttekintése és értékelése alapján az alábbi kísérleti és elméleti feladatok végrehajtását terveztem:

- HIP és SPS szinterelésű, monolitikus és többrétegű grafén (1 és 3 tömeg%) adalékolású Si_3N_4 nanokompozitok tribológiai viselkedésének vizsgálata ball-on-disc típusú kopásvizsgálatok elvégzésével a terhelőerőt és a csúszási sebességet széles tartományban változtatva; a kopási viselkedés jellemzésére különféle kvantitatív és kvalitatív jellemzők (kopási sebesség, dimenzió nélküli kopási tényező, súrlódási együttható, kopási mechanizmusok) meghatározása;
- A kopási viselkedéssel összefüggésbe hozható mechanikai tulajdonságok (keménység, hővezetési tényező, törési szívósság) meghatározása;
- A széles tartományt lefedő terhelési paraméterek függvényében meghatározott különféle kopási mérőszámok (fajlagos kopási sebesség, dimenziótlan kopási tényező) birtokában 2D és 3D típusú kopási térképek kidolgozása;
- Egy olyan kopási modell megalkotása, amely alkalmas mindkét gyártástechnológiával, mindhárom összetételben készült kerámia kompozitokon különböző terheléssel végzett kopásvizsgálatok során létrejövő kikopott térfogat becslésére.

Az elvégzett vizsgálatok lehetőséget adnak a vizsgált keramikus anyagok lehetséges és javasolt alkalmazási körének kibővítésére, továbbá alapul szolgálhatnak a további anyagtechnológiai fejlesztésekhez. A kapott eredmények várhatóan adatbázisokban is hatékonyan felhasználhatók. A kopási térképek többek között az anyagkiválasztásban nyújthatnak hasznos segítséget. A kopási jellemzők és az anyagtulajdonságok közötti kapcsolatok meghatározásával kidolgozott modellek pedig a kopási károsodás becslésére alkalmasak.

2. A FELADATOK MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

A szakirodalmi áttekintés során elsődleges feladatom a kísérleti kutatómunka elméleti hátterének megismerése és részletes célkitűzésének megfogalmazása. Ennek érdekében először tanulmányozom a vizsgált anyagok szerkezetét, mechanikai és fizikai tulajdonságait, lehetséges felhasználási módjait és szokásos gyártási eljárását. Ezt követően bemutatom az előállítás egy lehetséges új módszerét, amelynek kopásállóságra gyakorolt hatását kívánom elemezni. A vizsgálandó károsodási mód, azaz a kopás jelenségének és általános jellemzőinek bemutatása után ismertetem a kerámiák kopási viselkedésének sajátosságait, az alkalmazni kívánt kopásvizsgálati módszert és a károsodás elemzéséhez jellemzően használt kiegészítő vizsgálatokat.

A kopás vizsgálatokat ball-on-disc típusú kopásvizsgáló berendezésen kenőanyag nélkül, szobahőmérsékleten végeztem el, mindegyik anyagminőségen széles tartományban változtatva a különböző terhelési paramétereket ($F = 10–80$ N, $v = 10–200$ mm/s). A vizsgálatokhoz a Miskolci Egyetem Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézetének CETR-UNMT1 multifunkcionális felületvizsgáló berendezését használtam. Többféle vizsgálati paraméter – különböző terhelőerő, és csúszási sebesség – alkalmazásával az alábbi tribológiai jellemzőket határoztam meg:

- súrlódási együttható;
- kikopott térfogat a tárcsa kopásnyomán, ez alapján számítva a kikopott térfogat, a kopási sebesség és a dimenziónélküli kopási tényező értékét;
- a keletkezett kopásnyomok morfológiája;
- a károsodási folyamatot kontrolláló kopási mechanizmusok.

A ball-on-disc elvű vizsgálatokat kiegészítettem a súrlódó felületek felületgeometriai jellemzőinek meghatározásával, amelyhez a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetében található Altysurf 520 típusú profilometriai berendezését használtam. A minták felületének és az azokon létrehozott kopásnyomok pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálatát az ME Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében található Zeiss EVO MA 10-es típusú pásztázó elektronmikroszkópon az Intézet munkatársai segítségével végeztem.

A tribológiai vizsgálatok mellett számos további kiegészítő vizsgálatot végeztem, például a kopásvizsgálatok előtt meghatároztam a minták sűrűségét, fázisösszetételét, szövetszerkezetét, keménységét, Vickers-lenyomatos törési szívósságát, hővezetési tényezőjét, rugalmassági modulusát, valamint a felületi rétegükben kialakuló maradó feszültségeket.

Elméleti kutatómunka keretében a különböző szakirodalomban fellelhető kopási modellek áttekintésével és kritikai értékelésével megalkottam egy olyan mechanikai/tribokémiai modellt, amely jó közelítéssel becsli a kikopott térfogat értékét.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Monolitikus, valamint 1% és 3% többrétegű grafénnal (MLG-vel) adalékolt HIP és SPS gyártású Si_3N_4 kerámiák széles (F = 10; 40; 80 N; v = 10; 20; 50; 100; 150; 200 mm/s, l = 100 m) terhelési spektrumban és környezeti feltételek mellett (kenésmentes súrlódás, T = (27±3)°C, RH = (45±6)%) végrehajtott ball-on-disc típusú vizsgálatai alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg:

T1. A többrétegű grafén adalék kopásállóságra gyakorolt hatása komplex módon függ a gyártási eljárástól és a kerámiák összetételétől. **A vizsgált Si_3N_4 kerámiák kopásállóságát az SPS gyártási eljárás** MLG alkalmazása nélkül jelentősen rontja, míg **1 és 3% MLG hozzáadása mellett jelentősen javítja** az azonos összetételű HIP gyártású mintákhoz képest a vizsgált terhelési tartományban és adott vizsgálati körülmények között. A javulás hátterében az MLG adalék anyagszerkezetre és a kopást befolyásoló tulajdonságokra (keménység, szívósság, sűrűség, porozitás, hővezetési tényező stb.) gyakorolt összetett és komplex hatása áll (8) (13) (15).

T2. HIP gyártási eljárás alkalmazásakor a kopásállóságot az alkalmazott többrétegű grafén jelenléte és mennyisége egyértelműen befolyásolja. A **HIP eljárással készült Si_3N_4 kerámiák kopásállósága az MLG fázis jelenlétében a vizsgált terhelési spektrumban és adott vizsgálati körülmények között jelentősen romlik, azaz az alkalmazott grafén adalék nem javítja a kopásállóságot**. Ennek oka egyrészt az MLG fázis környezetében a hosszú idejű szintereléskor kialakuló pórusos szerkezet és annak feszültséggyűjtő hatása, másrészt az, hogy a karbon az alkalmazott terhelési feltételek esetén nem vesz részt transzfer-film kialakításában és nem képes szilárd fázisú kenőanyagként viselkedni (8) (16).

T3. **Fajlagos kopási sebességre és dimenzionélküli kopási tényezőre alapozott 2D kopásátmeneti térképeket, továbbá 3D kopási sebesség térképeket dolgoztam ki** a vizsgált háromféle összetételű és kétféle gyártási eljárással készült Si_3N_4 kerámiákra, **amelyek** elemzése **alapján** megállapítom, hogy **a HIP gyártású monolitikus minták kopása** az alkalmazott terhelési tartományban és adott vizsgálati körülmények között döntően a gyenge és erős kopás közötti **átmeneti tartományba esik**, az **MLG fázis hozzáadásával** az átmeneti tartomány rovására **az erős kopás tartománya kiszélesedik**. Az **SPS** gyártású **monolitikus mintáknál az erős kopás tartománya dominál**, **ezzel szemben MLG II. fázis hozzáadásakor** az SPS kompozitoknál nemcsak **megjelenik a gyenge kopás tartománya**, de **az erős kopás tartománya** is **szűkül**, és az MLG tartalom növelésével egyre kisebb területre terjed ki a legnagyobb *F* és *v* értékek irányában, **ami a HIP gyártású, azonos összetételű kompozit mintákhoz képest az SPS kompozitok kopásállóságának javulását igazolja**. Megállapítom továbbá, hogy a HIP gyártású monolitikus minták kopása a sebesség és terhelőerő

változásra a vizsgált tartományban nem érzékeny, míg a kompozitoknál bizonyos terhelési tartományokban és adott vizsgálati körülmények között jelentős erőfüggést mutat (8) (13) (15) (16).

T4. **A kopásnyomok** optikai és elektronmikroszkópos **morfológiai vizsgálata**, valamint **a kopási károsodást irányító uralkodó kopástípusok és kopási mechanizmusok meghatározása alapján megállapítom, hogy** a terhelőerő és a csúszási sebesség változásával a domináns kopási módok és kopási mechanizmusok jellegzetesen megváltoznak. **HIP minták esetén a tribokémiai kopás legtöbb esetben az abrazív és fáradásos kopással keverten jelentkezik, uralkodóvá csak nagyobb csúszási sebességek esetén válik**. Az **SPS gyártású kompozit minták esetén a vizsgált esetek többségében intenzív tribokémiai kopás lép fel, amely nagyobb terhelések esetén az erős kopás tartományára jellemző mechanikai kopással egészül ki.** A kopási mechanizmusok tekintetében HIP minták esetén a tribofilm képlékeny deformációja és delaminációja mellett a tribofilm fáradásos tönkremenetele a jellemző, nagy terheléseknél pedig interkrisztallin törés és olvadás lép fel, míg az SPS minták esetén a tribofilm képződése és képlékeny alakváltozása dominál, ami az SPS gyártású kompozit minták jelentősen kedvezőbb kopási viselkedését igazolja (7) (8) (13) (15) (16).

T5. A szakirodalomban található, Si_3N_4 kerámiákra kidolgozott kopási modellek felhasználásával – figyelembe véve a vizsgált kerámiák esetén az általam kidolgozott kopási térképek segítségével feltárt domináns kopástípusokat és mechanizmusokat – **egy fél-fizikai kopási modellt állítottam fel, amely egyidejűleg képes figyelembe venni a mechanikai kopás és a tribokémiai kopás okozta kopási anyagveszteséget. A** disszertáció (19) összefüggése szerinti **modell v = 100 mm/s csúszási sebességig a terhelőerőtől függetlenül jól közelíti a kopási kísérletek során meghatározott kikopott térfogat értékét, míg ennél nagyobb sebességeknél az F ≤ 40 N** terhelőerő **tartományban ad kellően pontos becslést** (5) (7) (12) (13).

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

1. A disszertációban bemutatott felületelőkészítési módszerek alkalmasak nagy keménységű műszaki kerámiák kopásvizsgálatához a szabvány által előírt felületi finomság biztosítására.
2. A vizsgált anyagokra megalkotott két- és háromdimenziós kopási térképek nagy információtartalmú, hasznos segédletként alkalmazhatók anyagfejlesztési- és kiválasztási folyamatokban, valamint segítségükkel megválasztható a vizsgált anyag optimális terhelési tartománya.
3. A meghatározott kopási mechanizmusok eredményesen alkalmazhatók a kopási károsodás modellezésekor, valamint hiánypótló eszközök lehetnek a vizsgált anyag tönkremeneteli folyamatainak megértésében.
4. A javasolt modell segítségével jól becsülhető a vizsgált műszaki kerámia minták kikopott térfogat értéke költséges és hosszadalmas kopásvizsgálatok nélkül.
5. A kutatások jövőbeli iránya a kopási viselkedés minél szélesebb körű feltárására irányul:
   - A vizsgálati paraméterek további bővítése, mind köztes pontok felvételével, mind a terhelőerő és a csúszási sebesség tartományának kiszélesítésével, a kisebb és nagyobb terhelések irányában;
   - A környezeti körülmények (páratartalom és hőmérséklet) befolyásoló hatásának vizsgálata;
   - A kopási törmelékek elemzése;
   - További anyagszerkezeti vizsgálatok;
   - A kopási modell továbbfejlesztése.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN RELEVÁNS PUBLIKÁCIÓK

Konferencia előadások

(1) Németh, A. K.: *Si_3N_4/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, Országos Tudományos Diákköri Konferencia Szekció, Anyagtudomány - Fémtani, fizikai jellemzők meghatározása, Szekció: II. hely Budapest, Óbudai Egyetem, 2015. 3. 25-27.

(2) Németh, A. K.: *Grafénnal adalékolt HIP és SPS gyártású szilícium-nitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2015. 11. 18-19.

(3) Németh, A. K.: *Si_3N_4/MLG kerámia nanokompozitok ball-on-disc vizsgálati tapasztalatai különös tekintettel a mikrogeometria és súrlódás kérdéseire*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2016. 11. 15.

(4) Németh, A. K., Marosné Berkes, M., Felhő , Cs., Benke, M.: *Monolitikus és grafénnal adalékolt Si_3N_4 kerámiák felület előkészítésének hatása a mikrogeometriai jellemzőkre és a feszültségi réteg maradó feszültségi állapotára*, Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, "G" szekció, Anyagtudomány-Anyagvizsgálat, I. Miskolci Egyetem 2016. 5. 25.

(5) Németh, A. K.: *Kopási térképek és modellek alkalmazása Si_3N_4/MLG nanokompozitok tribológiai viselkedésének jellemzésére*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2017. november 16.

(6) Németh, A. K., Maros Berkes, M.: *Wear maps of Si_3N_4/MLG nanocomposites for self-mated and unlike paired tribosystems under ball-on-disc sliding condition*, Fractography of Advanced Ceramics (poszter előadás), Smolenice, Szlovákia, 2016. 10. 9-12.

(7) Németh, A. K., Maros Berkes, M.: *Wear maps and models in tribological damage analysis of Si_3N_4 ceramics with special attention to tribochemical wear*, MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 2017. 4. 20-21.

(8) Németh, A. K., Maros, B. M., László, N.: *Wear maps of SPS produced Si_3N_4/MLG nanocomposites*, XXXII. microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, 5-6 September 2018.

Tudományos közlemények konferencia kiadványban

(9) Németh, A. K: *Si_3N_4/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, Diáktudomány VIII. kötet, Miskolci Egyetem 2015, pp. 117-123. ISSN 2062-07-21 *lektorált*

(10) Németh. A. K.: *Grafénnal adalékolt HIP és SPS gyártású szilícium-nitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2016, Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekció Kiadványa, (ed: Kovács László) pp. 47-54. ISBN 978-963-358-109-4

(11) Németh. A. K.: *Monolitikus és grafénnal adalékolt Si_3N_4 kerámiák felületelőkészítésének gyakorlati tapasztalatai*, Doktoranduszok Fóruma konferencia kiadványa, 2017, pp. 65-72. ISBN 978-963-358-127-8

(12) Németh. A. K.: *Kopási modellek alkalmazása Si_3N_4/MLG nanokompozitok tribológiai viselkedésének jellemzésére*, Doktoranduszok Fóruma 2017: GÉIK szekciókiadványa, 2018 pp. 69-75.ISBN 978-963-358-166-7

(13) Németh, A. K., Marosné, B. M.: *Wear maps and models in tribological damage analysis of Si_3N_4 ceramics with special attention to tribochemical wear,* microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, Hungary, 20-21 April 2017 ISBN 978-963-358-132-2 *lektorált*

Folyóiratcikkek

(14) Marosné Berkes, M., László, N., Németh, A. K.: *Műszaki kerámiák alkalmazása fémek kenőanyagmentes alakító eljárásainak szerszámanyagaként*, Multidiszciplináris tudományok, 6. kötet. 1 sz. 2016, Miskolci Egyetem Közleményei, pp. 95-104. ISSN 2062-9737

(15) Maros, B. M., Németh, A. K., Károly, Z. Bódis, E., Maros, Zs., Tapasztó, O., Balázsi, K.: *Tribological characterization of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology*, Tribology International, Volume 93, Part A, 2016, pp. 269–281 doi:10.1016/j.triboint.2015.08.041; http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X15003837 *lektorált IF: 2,903 (2016)*

(16) Maros Berkes, M., Németh, A. K.: *Wear maps of HIP sintered Si_3N_4/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions*, Journal of the European Ceramic Society Volume 37, 2017, Issue 14, pp. 4357-4369.

Könyvrészlet

(17) Beleznai, R., Belina, K., Dogossy, G., Fülep, D., Hargitai, H., Hatos, I., Kozma, I., Kovács, J. G., László, I., Marosné Berkes, M., Németh, A. K.: *Fejezetek nemfémes anyagok legújabb járműipari kutatási területeiből,* 2015, Széchenyi István Egyetem, Győr, ISBN 978-615-5391-36-1, pp. 142-212

Tudományos Diákköri dolgozatok és előadások

(18) Németh, A. K: *Graféннel adalékolt Si_3N_4 nanokompozitok kopási viselkedésének jellemzése*, Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolci Egyetem, Anyagtudomány, Gépgyártástudomány és Géptervezéstudomány szekció, 2013, nov. 22. pp. 1-55.

(19) Németh, A. K.: *Si_3N_4/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálat*, Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolci Egyetem, 2014. november 18. Anyagszerkezettani és Anyagtudományi Szekció, pp. 1-84.

Diplomaterv

(20) Németh, A. K.: *Graféннal adalékolt szilíciumnitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Diplomaterv, Gépészmérnök MSc, Miskolci Egyetem, 2015. pp. 1-120

Kutatási jelentések

(21) Marosné Berkes, M., Németh, A. K.: *A szikraplazma szinterelés sajátosságai és alkalmazása kerámiák előállításakor,* p1-30. 2013

(22) Marosné Berkes, M., Maros, Zs., Németh, A. K., Vass, Z., Szilágyiné Bíró, A.: *Kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, p1-35, 2014.

(23) Marosné Berkes, M., Maros, Zs., Németh, A. K., Vass, Z.., Szilágyiné Bíró, A.: *Nanofázissal erősített szilíciumnitrid kerámia kompozitok komplex vizsgálat*a, p.1-80 + mellékletek, 2014.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

[1] Riley, F. L.: *Silicon Nitride and Related Materials*, Journal of the American Ceramic Society 83, 2, 2000.

[2] Richerson, D. W.: *Modern Ceramic Engineering. Properties, Processing, and Use in Design*. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc. 1992. ISBN 0-8247-8634-3

[3] Dusza, J., Morgiel, J., Duszová, A., Kvetková, L., Nosko, M., Kun, P., Balázsi, Cs.: *Microstructure and fracture toughness of Si_3N_4 + graphene platelet composites*, Journal of the European Ceramic Society 32. pp.3389–3397. 2012.

[4] Sajgalik, P., Hnatko, M., Lofaj, F., Hvizdos, P., Dusza, J., Warbichler, P., Hofer, F., Riedel, R., Lecomte, E., Hoffmann M.J.: S*iC/Si_3N_4 nano/micro-composite - processing, RT and HT mechanical properties*, Journal of the European Ceramic Society 20, pp. 453-462, 2000.

[5] Lee, Ch., Wei, X., Kysar, J. W.: *Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of* Monolayer Graphene, J. Hone, Science 321, 2008, pp. 385.

[6] Tapasztó, O., Kun, P., Wéber, F., Gergely, G., Balázsi, K., Pfeifer, J., Arató, P., Kidari, A., Hampshire, S., Balázsi, C.: *Silicon nitride based nanocomposites produced by two different sintering methods*, Ceramics International 37, 2011, pp. 3457–3461

[7] Kasiarova, M., Rudnayova, E., Dusza, J., Hnatko, M., Sajgalik, P., Merstallinger, A., Kuzsella, L.: *Some tribological properties of a carbon-derived Si_3N_4/SiC nanocomposite*, Journal of the European Ceramic Society 24. pp. 3431–3435. 2004.

[8] Belmonte, M., Ramirez, C., Gonzalez-Julian, J., Schneider, J., Miranzo, P., Osendi, M. I.: *The beneficial effect of graphene nanofillers on the tribological performance of ceramics*, CARBON, 61 (2013) pp. 431–435, http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.102

[9] Tapasztó, O.: *Szén nanoszerkezetettek adalékolt szilicíum-nitrid nanokompozitok*, PhD értékezés, Budapest, 2012. pp. 1-89.

[10] Koncsik, Zs., Marosné Berkes, M., Kuzsella, L.: *Tribological characterisation of carbon nanotube added Si_3N_4 ceramic composites*, 2015

[11] Kuzsella Lászlóné Koncsik, Zs.: *Si_3N_4 műszaki kerámiák tribológiai és mechanikai vizsgálata*, PhD értekezés, Sályi István Gépészeteti Tudományok Doktori Iskola, Miskolc, 2014,

[12] Tewari, A. Basu, B. Bordia, R. K.: *Model for fretting wear of brittle ceramics*, Acta Materialia, Vol. 57, 2009, pp. 2080–2087.

[13] Tewari, A.: *Load dependence of oxidative wear in metal/ceramic tribocouples in fretting environment*, Wear 289, 2012, pp. 95–103

[14] Evans, A. G., Marshall, D. B.: *Wear mechanisms in ceramics, in: Fundamentals of Friction and Wear of Materials*; Rigney, D. A., ed., Materials Park, OH: ASM 1981. pp. 439-452.

[15] Hornbogen, E.: *The role of fracture toughness in the wear of metals*, Wear, Vol. 33, 1975, pp. 251-259.