

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



Si₃N₄ MŰSZAKI KERÁMIÁK TRIBOLÓGIAI ÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

KUZSELLA LÁSZLÓNÉ KONCSIK ZSUZSANNA

OKLEVELES MŰSZAKI MENEDZSER

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

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. MAROSNÉ DR. BERKES MÁRIA

PHD, EGYETEMI DOCENS

Miskolc, 2013.

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Dr. Tisza Miklós**
DSc, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem
- titkár: **Vadászné dr. Bognár Gabriella**
CSc, egyetemi docens, Miskolci Egyetem
- tagok: **Dr. Hegman Norbert**
PhD, kutató fizikus, Claas Kft.
- Dr. Balácsi Csaba**
PhD, intézetigazgató, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Anyagtudományi és Technológiai Intézet
- Dr. Eleőd András**
DSc, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Dr. Dusza János**
DSc, igazgató, Szlovák Tudományos Akadémia Anyagtudományi Kutatóintézet, Szerkezeti Kerámiák Osztálya és SAS Nanoszerkezetű Anyagok Központ
- Dr. Szabó Ferenc**
CSs, egyetemi docens, Miskolci Egyetem

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

A szilícium-nitrid műszaki kerámiákat a '60-as években kezdték intenzívebben kutatni, a belső égésű motorok fejlesztése céljából [1]. Bár ezen kutatási munkák 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, köszönhetően kiváló mechanikai tulajdonságainak, elsősorban tribológiai viselkedésének, nagy keménységének, szilárdságának, kiemelkedő fáradással szembeni ellenálló képességének, hősokkállóságának és vegyi ellenálló képességének [2].

Az értekezésben bemutatásra kerülő kutatómunka előzményeként a 2007-ben Kiváló Diplomatervező pályázat első díját nyert diplomatervem keretében végeztem tribológiai és egyéb mechanikai vizsgálatokat grafit részecskékkel 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. Ennek során elméleti és kísérleti kutatásokat végeztem kezdetben grafit, majd szén-nanocsövekkel adalékolt szilícium-nitrid nanokompozitok tribológiai viselkedésének tanulmányozása céljából. Doktori kutatásaim szervesen kapcsolódtak hazai és nemzetközi K+F pályázatokhoz, (OTKA T 046467, TIOP-1.3.1.-07/1-2F-2008-0005; TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008) amelyek jelentős támogatást nyújtottak a kutatások korszerű eszközháttérének biztosításához, így pl. egy Magyarországon jelenleg egyedülálló – mikro-nano szintű anyagi mérőszámok meghatározására alkalmas (UNMT-1) – felületvizsgáló berendezés beszerzéséhez.

1.2 A Si₃N₄ KERÁMIA NANOKOMPOZITOK FEJLESZTÉSÉNEK ÉS KUTATÁSÁNAK JELLEGZETES IRÁNYAI

A monolitikus műszaki kerámiák mechanikai tulajdonságait tekintve általánosan jellemzőnek mondható a már említett viszonylag nagy szilárdság és keménység, a kémiai stabilitás, az ebből eredő hő- és korrózióállóság, a kopásállóság, továbbá a kis sűrűség, valamint a kiváló mechanikai teljesítőképesség nagy hőmérsékleten való megőrzése. Kevésbé kedvező viselkedést mutatnak viszont a kvázisztatikus húzó- valamint a dinamikus igénybevételek fellépésekor, és ellentétben a fémekkel nem képesek képlékeny alakváltozásra. Ridegségük sok esetben határt szab a műszaki alkalmazások még szélesebb körű kiterjesztésére.

A különböző kompozitok készítésének célja valamilyen speciális tulajdonság/tulajdonság-együttes biztosítása, amely bizonyos alkalmazásokban előnyös lehet. Számos publikáció számol be a napjainkban gyártott szilícium-nitrid kerámia kompozitok különféle képviselőiről, a módosítani kívánt tulajdonság változtatásának jellegéről. Ezekben a szakirodalmi munkákban esetenként megtalálható az új fejlesztésű anyagra vonatkozó különféle mechanikai és egyéb tulajdonságok számszerű értéke is. Az anyagfejlesztés, azaz az egyre újabb összetételű kerámia kompozitok létrehozásának leggyakoribb célja a mechanikai tulajdonságok módosítása [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], azon belül is a nagy hőmérsékletű

szilárdság, illetve a törési szívósság javítása. Ezen túlmenően speciális, a kerámiákra nem jellemző olyan tulajdonságok, mint például az elektromos vezetőképesség biztosítása jelenik meg, mint kompozit készítési cél [13, 14, 15, 16, 17].

A szilícium-nitrid kerámia kompozitok második fázisaként napjainkban egyre gyakrabban jelennek meg az 1991-ben Iijama, japán tudós által a fullerén előállítás maradványainak elektronmikroszkópos vizsgálata során felfedezett [18] hosszú, csavart, grafityszerű csövecskék, a szén-nanocsövek (Carbon Nano-Tubes, CNT). A különféle módszerekkel előállított szén-nanocsöveket a kiinduló porkeverékhez adják hozzá, és a sajtolás, valamint a szinterelés folyamata már a mátrix és az erősítőfázis egyidejű jelenlétében történik. Bármilyen gondos is a porok előállítása és előkészítése, illetve bármilyen nagy sebességű őrlőmalmot alkalmaznak a kerámia porkeverék előállításakor, az ilyen összetételű társított kerámiák gyártástechnológiájának egyik problematikus kérdése a szén-nanocsövek egyenletes diszpergálása a mátrixban, ugyanis a rendkívül kicsiny méretű részecskék között ható van der Waals erők miatt szén-nanocső aggregátumok (csomók) képződhetnek, amelyek ronthatják a kompozit tulajdonságait. A [19] és a [20] szakirodalom rámutat, hogy az őrlési idő döntő módon befolyásolhatja a kerámia mátrix végső fázisösszetételét és ezáltal a kialakított kompozit mechanikai tulajdonságait. Ugyancsak ezen kerámia kompozitok specifikus gyártástechnológiai feladata az olyan optimalizált nagyhőmérsékletű szinterelési folyamatok kidolgozása, amellyel elkerülhető a szén-nanocsövek nagy hőmérsékleten fellépő roncsolódása [19].

A nanoszerkezetű anyagok felhasználásakor, alkalmazásakor számolni kell továbbá a környezeti hatások miatt bekövetkező szerkezet- és tulajdonságváltozásokkal, amelyek a nagy kiterjedésű határfelületek jelenléte miatt, illetve a nano-méreték, a termodinamikailag instabil állapot és a lokálisan megváltozott atom-és elektronszerkezet következtében másképpen játszódnak le, mint a hagyományos ún. térfogati anyagokban [18]. A második fázis és az alapmátrix közötti határfelületi kapcsolat is jelentősen befolyásolja a kompozit tulajdonságait. Kerámia mátrixú kompozitok esetében különösen igaz ez a törési viselkedésre. Egy erős határfelületi kapcsolat nem áll ellen az arra haladó repedésnek, és a kompozit ridegen törik, míg a gyenge határfelületi kapcsolat repedés terjedést gátló hatással rendelkezik [21].

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 mechanikai teljesítőképességének minél szélesebb körű feltérképezése is. A mechanikai tulajdonságok meghatározásával lehetőség nyílik a kerámia nanokompozit minél szélesebb körű alkalmazási lehetőségeinek feltárására, ami jelen értekezés alapvető célkitűzése is. Mivel a kerámiák egyik legfontosabb felhasználási területe a kopásnak kitett alkalmazásokhoz készülő különféle termékek, alkatrészek előállítása ezért a kopási viselkedés elemzése, és a tribológiai mérőszámok vizsgálata, meghatározása egy alapvetően fontos kutatási irány.

1.3 A MŰSZAKI KERÁMIÁK TRIBOLÓGIAI VISELKEDESÉNEK JELLEMZÉSÉRE VONATKOZÓ LEGFONTOSABB ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI MÓDSZEREK

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, 22] mind a különféle II. fázissal erősített szilícium-nitrid alapú kerámia kompozitok tekintetében [23, 24], 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.

Viselkedésük megértése valamint a tudatos anyag- és technológiatervezés, továbbá egy adott feladatra – pl. kopásnak kitett alkalmazásra – vonatkozóan a legoptimálisabb felhasználói tulajdonságok, tulajdonságkombinációk kifejlesztése ezért az anyagok vizsgálatát, jellemzését igényli. Második fontos lépés ebben a megismerési folyamatban tehát az újonnan kifejlesztett, ezért még ismeretlen tulajdonságú anyagok komplex tribológiai jellemzése, mindenképp egy, a termék funkciójából eredő igénybevételi viszonyokat leginkább reprezentáló kopási rendszer jellemzőinek vizsgálata és a legfontosabb kopási mérőszámok meghatározása. Ehhez fontos áttekinteni és értékelni azokat a napjainkban használatos szokásos és szabványos mérés-technikai és vizsgálati módszereket, amelyekkel a kopásnak kitett kerámiákat jellemezzük. Ezek közül legfontosabbak a változatos elrendezésű tribológiai vizsgálatok, keménységmérés, törési szívósság vizsgálat, rugalmassági modulus meghatározása, anyagszerkezeti vizsgálatok.

A kopási károsodással kapcsolatba hozható, azt leginkább tükröző anyagi mérőszámok tekintetében hasznos útmutatásul szolgálnak a kerámiák kopását leíró elméleti modellek [25, 26, 27], amelyek egyértelműen jelzik a fémes anyagokhoz képest eltérő viselkedésüket és az azzal kapcsolatba hozható anyagi sajátosságokban mutatkozó különbséget.

Bármely anyagi tulajdonságot, így a kopással szembeni ellenállást, a kopásnak kitett igénybevétel során tanúsított viselkedést alapvetően befolyásolja az anyag szerkezete. Ezért a mechanikai tulajdonságokon túlmenően a kerámiák gyártástechnológiájának ismerete és az előállítás során bekövetkező anyagszerkezeti változások, (a szinterelést követően kialakuló fázisösszetétel, az egyes fázisok határán fellépő kémiai és fizikai jelenségek) is meghatározó szereppel bírhatnak. Ezt igazolják az idevonatkozó legújabb tudományos kutatások eredményei [19, 20].

1.4 CÉLKITŰZÉS

Az értekezés célja a különböző mennyiségben – 1, illetve 2 térfogat% – többfalú szén-nanocsövet tartalmazó szilícium-nitrid kerámia nanokompozitok tribológiai viselkedésének minél szélesebb körű jellemzése. A tribológiai viselkedés megismeréséhez azonban nélkülözhetetlen a tribológia, mint elméleti tudomány megismerése, illetve a műszaki kerámiák speciális tribológiai jellemzésének felkutatása.

A korszerű vizsgálati anyag komplex tribológiai jellemzéséhez további mechanikai mérőszámok megadása is szükséges, így a keménység, törési szívósság, illetve a szilárdsági mérőszámok közül a hajlítoszilárdság és a rugalmassági modulus. A mechanikai tulajdonságokon túlmenően a kerámiák gyártástechnológiájából adódóan az anyagszerkezet, a szinterelést követő pontos összetétel, illetve az egyes fázisok határán fellépő kémiai és fizikai jelenségek is meghatározó szereppel bírhatnak.

Fenti célkitűzésnek megfelelően kutatási feladatként az alábbiakat fogalmaztam meg:

- a *szakirodalmi áttekintés* célja egyrészt a kísérleti munka pontos megtervezéséhez szükséges minimális mintaelem-szám meghatározásán túl, a kísérleti munka számszerű eredményeinek elemzéséhez szükséges matematikai statisztikai lehetőségek megismerése, bemutatása; másrészt a kísérleti munka előkészítéseként a vizsgálni kívánt műszaki kerámia alapvető tulajdonságainak megismerése, illetve a vizsgálatokhoz szükséges vizsgálati módszerek, vizsgálati kiértékelési lehetőségek bemutatása, és a vonatkozó szabványi háttér feltérképezése.

1. Elméleti kutatómunka

- a kopási folyamatokra vonatkozó terminológiai és rendszerezésbeli hiányosságok, ellentmondások feloldására egy olyan új kopási osztályozási rendszer kidolgozása, amely alkalmas a kopási folyamatok jellemzése során használt, a szakirodalomban napjainkban még nem egységesen tárgyalt fogalmak, elsősorban a kopási mechanizmusok és kopástípusok egyértelmű azonosítására és osztályba sorolására;
- a javasolt új osztályozási rendszernek megfelelő csoportosításban a kopási mechanizmus és a kopástípus fogalmak korszerű, általánosabb érvényű definíciójának megadása;
- a kísérleti munka során vizsgálni kívánt Si₃N₄-MWCNT nanokompozitok törési szívósságának meghatározására leginkább alkalmas kiértékelő összefüggés kiválasztása elméleti megfontolások útján.

2. Kísérleti kutatómunka

- monolitikus és MWCNT adalékolású Si₃N₄ alapú kerámia nanokompozitok tribológiai viselkedésének kísérleti vizsgálata, ennek során:
 - a vizsgált anyagokon tribológiai vizsgálatok végzése két különböző – „block-on-block”, valamint „pin-on-disc” – módszerrel, különböző vizsgálati paraméterekkel (érintkezési mód, kenőanyag, abrazív szemcse, terhelőerő, vizsgálati sebesség);
 - a kopási viselkedés széleskörű jellemzése különféle kvantitatív és kvalitatív jellemzők – kopási tényező, súrlódási együttható, ellentest kopás, kopástermékek minőségi jellemzői, a károsodási folyamat során fellépő kopási mechanizmusok, kopási térképek – segítségével;
 - a kopási viselkedéssel összefüggésbe hozható mechanikai tulajdonságok – keménység, Vickers-lenyomatos törési szívósság, hajlítózilárdság és rugalmassági modulus – meghatározása;
 - a tribológiai viselkedést alapvetően meghatározó anyagszerkezeti jellemzők elemzése: mikroszerkezeti és röntgendiffrakciós vizsgálatok elvégzése;
 - a kísérleti eredmények alapján kapcsolat keresése a tribológiai mérőszámok és más mechanikai vagy anyagszerkezeti jellemzők között.

3. Új tudományos eredmények megfogalmazása

Az elméleti és kísérleti kutatómunka komplex áttekintésével új tudományos eredmények, tézisek megfogalmazása és javaslattétel azok hasznosítási lehetőségeire.

2. A FELADATOK MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Az *elméleti kutatómunka* során kiemelten foglalkoztam a szakirodalomban fellelhető kopási mechanizmusok és kopástípusok elemzésével. A legtöbb szerző [29, 34, 35] nem tesz különbséget a kopástípus és a kopási mechanizmus elnevezése, tartalma között, ami nehézkessé teszi a kopási folyamatok jellemzését, leírását és megértését.

A kopási folyamatok modellezésének egyik első lépése egy olyan rendszer megalkotása kell legyen, amely magában foglalja a jelenleg ismert kopástípusokat és kopási mechanizmusokat, ugyanakkor bármely irányban bővíthető, amennyiben az szükséges. A témában tapasztalt

értelmezésbeli és rendszerezésbeli ellentmondások feloldása, hiányosságok pótlása érdekében felhasználva számos magyar [28, 29, 30] és idegen nyelvű publikációt [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37] kidolgoztam egy saját osztályozási rendszert. A rendszerezés alapja a kopási folyamat során fellépő jellemző igénybevétel típusa volt, amelyet három alapvető kategóriába soroltam: mechanikai (M), termikus (T) és környezeti (K). Az igénybevételek típusán belül kopási mechanizmusokat különítettem el a kopási jelenség során lejátszódó, jellemző fizikai és kémiai folyamatok szerint, a kopási mechanizmusokon belül kopástípusokat neveztem meg a kopási károsodási folyamat megjelenése, morfológiai jellemzői alapján.

A *kísérleti kutatómunka* során kétféle tribológiai vizsgálati módszert alkalmazva – „block-on-block”, és „pin-on-disc” elvű vizsgálatok segítségével – jellemeztem a vizsgált kerámia anyagok tribológiai viselkedését. Mind a tribológiai, mind a kiegészítő vizsgálati módszerek megfelelő alkalmazásához áttekintettem a vonatkozó szabványi hátteret [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]. A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén található LaboPol 21-es típusú csiszoló-polírozó berendezés segítségével „block-on-block” elvű, különböző abrazív ellentesttel, kenőanyag jelenlétében két- és háromtestes abrazív koptatóvizsgálatokat végeztem. Kiszámítva a csiszolóberendezésben a próbatest által adott idő alatt megtett út hosszát – amely egy hipocikloisnak felel meg – javaslatot tettem egy viszonylag egyszerűen kivitelezhető, költségtakarékos kopásvizsgálati mérési módszerre. A javasolt módszer egy csiszolóberendezéssel végezhető, tömegméréssel kiegészített vizsgálati eljárás, amely alkalmas az adott vizsgálati körülmények között értelmezhető kopási tényező számszerű értékének meghatározására.

A „pin-on-disc” elvű tribológiai vizsgálatokat szintén a Mechanikai Technológiai Tanszéken végeztem egy Magyarországon egyedülálló multifunkcionális (CETR-UNMT-1 típusú) felületvizsgáló berendezésen. Többféle vizsgálati paraméter – különböző terhelőerő, és csúszási sebesség – alkalmazásával az alábbi tribológiai jellemzőket határoztam meg:

- súrlódási együttható;
- kikopott térfogat a mintadarabon és az ellentesten, ebből kopási tényező;
- a keletkezett kopásnyomok morfológiája;
- a károsodási folyamatot kontrolláló kopási mechanizmus.

Mind a „block-on-block”, illetve a „pin-on-disc” elvű vizsgálatokat kiegészítettem a súrlódó felületek felületgeometriai jellemzőinek meghatározásával, amelyhez a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszékén található Altysurf 520 típusú háromdimenziós érdességmérő berendezést használtam. A minták felületének és az azokon létrehozott kopásnyomoknak a pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálatát az ME Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében található Zeiss EVO MA 10-es típusú pásztázó elektronmikroszkópon végeztem.

A kiegészítő mechanikai vizsgálatok egy része – microVickers keménységmérés, Vickers-lenyomatos törési szívósság vizsgálat – az ME Mechanikai Technológiai Tanszékén, más része – rugalmassági modulus és hajlítószilárdsági vizsgálatok – az MTA Természettudományi Kutatóközpontja Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében történtek. Az anyagszerkezeti jellemzéshez szükséges röntgen-diffrakciós és mikroszerkezeti vizsgálatokat az ME Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében végeztem.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T.1.** A különféle kopási jelenségek szakirodalomban fellelhető definíciójának elemzésével egységes szempontok alapján megalkottam egy olyan új osztályozási rendszert, amely az alapvető igénybevételek/igénybevétel kombinációk alapján főcsoportokat képezve a kopási folyamat során lejátszódó jellemző (irányító) fizikai/mechanikai és kémiai folyamatok szerinti kopási mechanizmusokat nevez meg, illetve az adott kopási mechanizmuson belül a bekövetkező kopási károsodások megjelenési formája, morfológiai sajátosságai alapján jellemző kopástípus osztályokat definiál (6.), (23.).
- T.2.** Modellkísérletek tapasztalatait felhasználva kidolgoztam egy egyszerű, költséghatékony, csiszoló-polírozó berendezésen megvalósítható, tömegméréssel kiegészített kopásvizsgálati módszert. A próbatest által leírt hipociklois pályagörbe úthossza ismeretében megadható az adott vizsgálati körülmények között értelmezhető abrazív kopási tényező számszerű értéke a kenőanyag, illetve három-tesztés abrazív kopást megvalósító „block-on-block” típusú tribo-rendszerben, azaz számszerűen jellemezhető a vizsgált anyag abrazív kopással szembeni ellenállása (2.), (9.), (16.).
- T.3.** A különböző paraméterekkel végzett „pin-on-disc” elvű kopásvizsgálatok eredményeit felhasználva, továbbá a jellemző kopási mechanizmusokat és kopástípusokat a saját osztályozási rendszer (T.1.) alapján azonosítva, a vizsgált monolitikus és kompozit kerámiákra kétdimenziós kopási mechanizmus/kopástípus térképeket dolgoztam ki, valamint háromdimenziós kopási tényező térképeket alkottam. Az így meghatározott különféle kopási térképek az adott kerámia típusokra vonatkozóan a vizsgálatokban szereplő és hasonló kompozit kerámiák viselkedésének szemléletes és átfogó jellemzésére, megértésére alkalmasak.
- T.4.** Monolitikus, valamint 1 térfogat% és 2 térfogat% mennyiségű többfalú szén-nanocsővel adalékolt szilícium-nitrid kerámiákon végrehajtott „pin-on-disc” típusú kenőanyag nélküli kopásvizsgálatokkal meghatározott kopási együtttható értékek alapján a következőket állapítottam meg:
- T4. a)** Az adott mátrixanyagú kerámia esetén a második fázis formájában jelenlévő szén-nanocső adalék mennyiségének növelésével a vizsgált összetételi tartományban a kopási együtttható növekszik (a kopási ellenállás romlik).
- T4. b)** A terhelőerő változásával a károsodási folyamatot kontrolláló kopási mechanizmusok és kopástípusok szisztematikusan változnak, kisebb terhelések esetén a folyamatot a képlékeny alakváltozás és ridegtörés együttesen kontrollálja és a jellemző kopástípusok a delaminációs kopás és fáradásos kopás, míg nagyobb terhelőerőknél a képlékeny alakváltozás, illetve tribokémiai folyamatok által kontrollált kopási mechanizmus ezeken belül delaminációs, filmképződéses, és olvadásos kopás jellemzi a károsodási folyamatot (1.), (2.).
- T4. c)** A vizsgált kerámia kompozitoknál megadható egy olyan terhelési paraméterkombináció, amelynél mindhárom mintaösszetétel esetén lokális minimuma van a kopási károsodásnak. Ez lehetővé teszi a kopási folyamatok optimalizálását a terhelési paraméterkombinációk megfelelő megválasztásával.

- T.5.** Egyértelmű összefüggést állapítottam meg a vizsgált kompozitok mechanikai jellemzői valamint a kopással szembeni ellenállása között, amely a vizsgált műszaki kerámiák keménységének (HV), négyponos hajlítószilárdságának (R_{h4}), illetve rugalmassági modulusának (E) növekedésével egyértelmű növekedést mutat (3.), (4.), (25.), (26.).

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

1. A kidolgozott kopási osztályozási rendszer
 - hiánypótló eszköz lehet a különféle anyagfajták különféle okokra visszavezethető és változatos kopástípusok formájában megjelenő kopási károsodási folyamatainak egységes szempontokra épülő rendszerező áttekintésére;
 - ugyancsak hasznos elvi alapokat adhat a hazai és nemzetközi szabványosítási munkákban mind a fémes és keramikus anyagok kopási viselkedésének tárgyalásához, illetve célszerűen és folyamatosan bővítve egyéb pl. polimer alapú anyagok, kompozitok kopási károsodásainak rendszerezéséhez;
 - eredményesen alkalmazható a különféle anyagok kopási károsodásának modellezési folyamataiban;
 - valamint hasznosítható az oktatás területén.
2. A disszertációban bemutatott csiszoló berendezésen megvalósítható, tömegméréssel kiegészített általam javasolt kopásvizsgálati módszer
 - egyszerű, olcsó és jól reprodukálható vizsgálati módszer összehasonlító, kenőanyaggal végzett, illetve három-tesztés abrazív kopást megvalósító „block-on-block” típusú tribológiai vizsgálatok végzésére;
 - hatékony segítséget jelenthet drága kopásvizsgáló berendezésekkel nem rendelkező laboratóriumok számára összehasonlító, ún. Round-Robin vizsgálatssorozatok elvégzésére.
3. A vizsgált anyagokra megalkotott két- és háromdimenziós kopástérképek az anyagadatbázisokban könnyen tárolható, nagy információtartalmú, hasznos segédletként alkalmazhatók a hagyományos és számítógépes anyagkiválasztási folyamatokban, továbbá alkalmazhatók az oktatási munkában.
4. A kutatások jövőbeni iránya a kopási viselkedés minél szélesebb körű feltérképezésére irányul, amely magában foglalja:
 - a disszertációban bemutatott két- és háromdimenziós kopási térképek pontosítását további – köztes igénybevételi állapotoknak megfelelő – paraméterkombinációkkal végzett „pin-on-disc” elvű kopásvizsgálatok segítségével;
 - a környezeti körülmények (páratartalom, hőmérséklet, kenőanyag) szabályozásával kivitelezett további tribológiai vizsgálatokat;
 - a kopási mechanizmusok és az anyagszerkezet közötti kapcsolat vizsgálatát.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN RELEVÁNS PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- (1.) Koncsik Zs.; Marosné B.M.; Kuzsella L.: **Kopásvizsgálatok szilícium-nitrid nanokompozitokon**, XXV. Hőkezelő Konferencia, Balatonfüred, 2012.10.03-05. poster session
- (2.) Zs. Koncsik, M. B. Maros, L. Kuzsella: **Tribological characterisation of carbon nanotube added Si₃N₄ ceramic composites**, 39th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, 4-7. September, 2012
- (3.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Relationship between tribological and other mechanical properties of Si₃N₄/SiC/graphite composites**, Contact Mechanics and Surface Treatment 2009; Algarve, Portugália, 2009. június 9-11.
- (4.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Correlation between the tribological and mechanical properties of Si₃N₄/SiC/graphite composites**, MicroCAD konferencia 2009. 03. 19-20. Miskolc, Anyagtudomány és Mechanikai technológiák szekció
- (5.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Effect of graphite additives on the tribological behaviour of Si₃N₄ nanocomposites**, Fractography of Advanced Ceramics 2008. 09. 07-10., Szlovákia, Stara Lesna, poster session
- (6.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **Some aspects of modelling wear mechanisms of ceramics**, MicroCAD konferencia 2008. 03. 20-21. Miskolc, Gépgyártástechnológia és gyártórendszerek szekció
- (7.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **A kerámia jelentősége és jövője, különös tekintettel a tribológiai alkalmazásokra**, Kiváló diplomatervező pályázat előadása, Magyar Mérnökök és Építészek Svájci Egyesületének Szakmai Konferenciája, ETH-Zürich, Svájc, 2007.11.13.

KONFERENCIA KIADVÁNYBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

- (8.) Koncsik Zs., Kuzsella L., Lukács J., Marosné B. M.: **Speciális vizsgálatok szerkezetek integritásának megítéléséhez**, 6. AGY konferencia, Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szakmai Szeminárium, 2012. június 6-8. Cegléd, (*CD kiadvány megjelenés alatt*)
- (9.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Si₃N₄ 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
- (10.) Tisza M., Marosné B. M., Koritárné F. R., Kuzsella Lné K. Zs.: **Gördülőelemes hajtásokban alkalmazható fémes- és nemfémes anyagok**, K+F eredmények összefoglalása, GOP-1.1.2-08/1-2008-0002, Kiadó: Uni-Flexys Egyetemi Innovációs Kutató és fejlesztő Közhasznú Nonprofit Kft., ISBN 978-963-89509-0-1, pp. 49-61. 2012.
- (11.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Fázisátalakulások grafittal adalékolt Si₃N₄ kerámia kompozitokban**, MTEKMR: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2011 konferencia előadásai, MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, pp. 81-89, ISBN 978-963-7064-25-8, 2011.

- (12.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Tribological Investigation of Si₃N₄ Nanocomposites**, Friction, Wear and Wear Protection, edited by Alfons Fischer and Kirsten Bobzin, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 978-3-527-32366-1, pages 393-401, 2009.
- (13.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **Experiences on pin-on-disc wear test and another mechanical tests of Si₃N₄ C-nanocomposites**, Doktoranduszok Fóruma, Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centruma, 2007. pp 64-71.
- (14.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **Si₃N₄ kerámiák tribológiai vizsgálata**, Műszaki Tudományos füzetek, XII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Erdélyi Múzeum Egyesület, ISBN 973-8231-67-1 pp. 137-140. 2007.
- (15.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **Experiences on pin-on-disc wear test of Si₃N₄ C-nanocomposites**, MicroCAD 2007 International Scientific Conference 2007, Section D, Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centruma, ISBN 978-963-661-742-5, pp. 37-44.

FOLYÓIRAT CIKKEK

- (16.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Abrasive wear testing of Si₃N₄ ceramic composites**, Materials Science Forum, Vol. 729., Trans Tech Publications, Switzerland, 2013. pp 55-60. ISSN print 0255-5476; ISSN web 1662-9752
- (17.) Koncsik Zs.; Molnár V.; Marosné B.M.; Kuzsella L.: **Az érdességmérés alkalmazhatóságának lehetőségei és korlátai műszaki kerámiák kopásvizsgálata során**, GÉP, 2012/11. LXIII. évfolyam, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, ISSN 0016-8572, pp. 55-65.
- (18.) Zs. Koncsik, M. B. Maros, L. Kuzsella: **Tribological characterisation of carbon nanotube added Si₃N₄ ceramic composites**, Tribology International, (*megjelenés alatt*)
- (19.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Die Entwicklung neuer Phasen in Si₃N₄ Keramik-Kompositen**, Journal of Production Processes and Systems, vol. 6. (2012) No. 1., pp. 31-38.
- (20.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Új fázisok kialakulása grafitral adalékolt Si₃N₄ kerámia kompozitokban**, Miskolci Egyetem Közleményei, Multidiszciplináris tudományok, 1. kötet (2011) 1. szám, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, HU ISSN 2062-9737, 2011., pp. 119-126.
- (21.) Lukács, J.; Cserjésné, S. Á.; Gál, I., Koncsik, Zs.; Koritárné, F. R.; Marosné, B. M.; Nagy, Gy; Szávai, Sz.; Tóth, L.: **A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke Anyagvizsgáló szakcsoportjának kutatási tevékenysége a 2001-2010 közötti időszakban**, GÉP, A gépipari tudományos egyesület műszaki folyóirata, 2011/4. LXII. Évfolyam, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, pp- 17-23, ISSN 0016-8572, INDEX: 25 343, 2011.
- (22.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Si₃N₄/SiC/grafit kerámia kompozitok mechanikai tulajdonságai**, GÉP, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, LXI. Évfolyam, 2010/3. pp. 10-15. ISSN 0016-8572, INDEX: 25 343

- (23.) Zs. Koncsik: **Műszaki kerámiák kopási mechanizmusainak rendszerezése**; Műszaki Füzetek, 2010., MTA Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, HU ISSN 2060-7954, pp 251-257. Műszaki Tudomány az Észak-Alföldi Régióban 2010 konferencia előadásai, szerk: Pokorádi László, ISBN 978-963-7064-23-4, Debrecen, 2010.
- (24.) Zs. Koncsik: **Si₃N₄ kerámiák mechanikai viselkedése II. Tribológiai jellemzés**; Műszaki Füzetek, 2010., MTA Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, HU ISSN 2060-7954, pp 241-247. Műszaki Tudomány az Észak-Alföldi Régióban 2010 konferencia előadásai, szerk: Pokorádi László, ISBN 978-963-7064-23-4, Debrecen, 2010.
- (25.) Koncsik Zs., Maros B. M., Kuzsella L.: **Mechanical testing of Si₃N₄/SiC/graphite ceramic composites**, 2010. Materials Science Forum, Volume 659. Materials Science, Testing and Informatics V., Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. ISSN 0255-5476. pp: 313-318.
- (26.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **Tribological Behaviour of C-derived Si₃N₄ Nanocomposites**, Materials Science Forum Vol. 589 in September 2008, Materials Science, Testing and Informatics IV. pp. 403-408. Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN 0255-5476

TANULMÁNYOK

- (27.) Zs. Koncsik: **A járműiparban alkalmazott műszaki kerámiák fejlesztési trendjei**, TÁMOP tanulmány, Számítógépes tervezés helyzete és fejlesztésének fő irányai c. tanulmány, ME-MTT, 2011. pp. 1-13.
- (28.) M. B. Maros; Zs. Koncsik: **Felületvizsgáló eszközháttér bemutatása a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén**, TÁMOP tanulmány, Helyzetelemzés - Hőkezelő Szakcsoport, ME-MTT, 2011. pp. 1-33.
- (29.) Koncsik Zs., Maros B.M., Kuzsella L.: **Tribológiai és egyéb mechanikai jellemzők kapcsolatának vizsgálata Si₃N₄/SiC/grafit kerámia kompozitokon**, ME MTT OTKA T 046467 tanulmány, pp 20. Miskolc, 2008.
- (30.) Koncsik Zs.: **Inhomogén anyagszerkezetek repedéskeletkezési és repedés terjedési sajátosságainak elemzése különös tekintettel a korszerű kerámia és kompozit anyagokra**, ME MTT OTKA NI 61724 tanulmány, pp 15. Miskolc, 2008.
- (31.) Koncsik Zs.: **Fémes és nemfémes anyagok adatainak gyűjtése, elemzése és feldolgozása a végeelemes modellező szoftverek igényeinek figyelembevételével**, ME MTT OTKA NI 61724 tanulmány, pp 15. Miskolc, 2008.
- (32.) Maros B. M., Kuzsella L., Koncsik Zs.: **A műszerezett keménységmérés problematikája, megbízhatósága, kísérleti tapasztalatok Si₃N₄ C-nanokompozitokon**, ME MTT OTKA T 046467, OTKA NI 61724 tanulmány, pp 20. Miskolc, 2007.
- (33.) Maros B. M., Koncsik Zs.: **Si₃N₄ nanokompozit kerámiák tribológiai vizsgálatának tapasztalatai**, ME MTT OTKA T 046467 tanulmány, pp 44. Melléklet: pp 23. Miskolc, 2006.

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZATOK ÉS ELŐADÁSOK

- (34.) Koncsik Zs.: **Si₃N₄ nanokompozitok tribológiai vizsgálata**, XXVIII. OTDK, Műszaki Tudományi Szekció, Anyagtudomány, Anyagvizsgálat II. Szekció, II. helyezés, Győr, 2007. 04. 02-04., Széchenyi István Egyetem, XXVIII. OTDK, Műszaki Tudományi Szekció Resume kötete pp 50. ISBN 978-963-7175-32-9
- (35.) Koncsik Zs.: **Si₃N₄ nanokompozitok tribológiai vizsgálata**, Miskolci Egyetem, Tudományos Diákköri Konferencia, Gépészmérnöki Kar, Gépészeti Anyagtudomány, Gyártási Rendszerek és Technológiák Szekció, 2006. 11. 22. p 39.+ mellékletek: p 46.

DIPLOMAMUNKA

- (36.) Koncsik Zs.: **Si₃N₄ nanokompozitok tribológiai vizsgálata**, 2007.
- (37.) Koncsik Zs.: Diplomafordítás németről magyarra, 2007.
- Rosemarie Buhlmann, Anneliese Fearn: **NTF, Hinführung zur naturwissenschaftlich-technischen Fachsprache** (Max Hueber Verlag, Teil 3: Baustoffkunde, 1984. ISBN 3-19-00.1323-3) pp18-19.
 - Hans Eisenreich, Claus Köhler, Renate Meinecke, Arthur Michel, Werner Reinhardt, Herbert Riedel: **Deutsch für Techniker** (VEB Verlag Enzyklopädie Leipzig, 1975) pp. 137-140
 - Dipl.-Ing. Horst Bauer **Kraftfahrtechnisches Taschenbuch** (25. Auflage, Robert Bosch GmbH, 2003, ISBN 3-528-23876-3) pp 303-310.

OKTATÁSI SEGÉDLET

- (38.) Maros, B. M.; Koncsik, Zs.: **Különböző mikroszkópok jellemzői és alkalmazása, oktatási tananyag**, TÁMOP oktatási tananyag, pp. 1-22. 2012
- (39.) Kuzsella L; Koncsik Zs.: **A GDOS vizsgálati technika**, TÁMOP oktatási tananyag, pp. 1-22. 2012

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN NEM RELEVÁNS PUBLIKÁCIÓK

KONFERENCIA ELŐADÁSOK

1. L. Kuzsella, E. Szabó, Zs. Koncsik, **Abrasive wear testing of nitrided surfaces**, Contact Mechanics and Surface Treatment 2009, Algarve, Portugalia, 2009. jun. 9-11.
2. Maros, B. M., Barkóczy, P. Fazekas A., Szeghalmy, Sz., Koncsik, Zs.: **Üvegfelületek minősítése számítógépes képelemzéssel kiegészített karcvizsgálattal**, Carl Zeiss Szakmai Nap, MAB, Kohászati Szakbizottság, Miskolc, 2008. 10. 02.
3. Koncsik Zs.: **Túravezető a Zempléni-hegységbe**, XI. Nemzetközi környezetvédelmi és vidékfejlesztési diákkonferencia, 1. szekció, Mezőtúr, 2005. 07. 06-08.

KONFERENCIA CIKKEK

4. Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: **A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiákban**, 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. 211-217.
5. Kuzsella, L.; Koncsik, Zs.: **The Effect of Longitudinal Compression on the Structure and Mechanical Properties of Beech Wood Material**, WOOD NDT Proceedings, 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Vol. 2/1., ISBN 978-963-9883-81-9; ISBN 978-963-9883-83-3 volume 2., University of West Hungary, Sopron, pp. 757-764.
6. Sz. Szeghalmy, Zs. Koncsik, M. B. Maros, A. Fazekas, P. Barkóczy: **Üvegfelületek elemzése képelemző módszerrel kiegészített karcvizsgálattal**, CD Proceedings of KEPAF 2009. pp. 9. (magyar nyelvű lektorált cikk)

FOLYÓIRATCIKKEK

7. Zs. Koncsik, J. Lukács: **Design Curves for High-Cycle Fatigue Loaded Structural Elements**, Materials Science Forum, Vol. 752, pp.135-144. 2013.
8. Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: **Application of risk-informed inspection strategy to improve the lifetime and efficiency of cleaning pigs**, Materials Science Forum, Vol. 729., Trans Tech Publications, Switzerland, 2013. pp. 338-343 ISSN print 0255-5476; ISSN web 1662-9752
9. Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: **Conception of materials data collection for numerical modelling of technological processes**, Journal of Production Processes and Systems, vol. 6. (2012) No. 1., pp. 107-114.
10. Maros B. M.; Koncsik Zs.: **Üvegek maradó feszültségének jellemzése műszerezett karcvizsgálattal**, Miskolci Egyetem Közleményei, Multidiszciplináris tudományok,, 1. kötet (2011) 1. szám, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, HU ISSN 2062-9737, 2011., pp. 221-228.

11. Koncsik Zs., Lukács J., Nagy Gy., Török I.: **Poliuretán elasztomer csőtisztító szerszámokkal szemben támasztott követelmények**, Tudáshálózat és klaszterépítés, Az Észak-magyarországi régió tudásközpontjainak a regionális gazdaságfejlesztéshez és klaszterépítéshez kapcsolódó kutatási eredményei és hasznosítható tapasztalatai, NORRIA Északi-Magyarországi Regionális Innovációs Ügynökség Nonprofit Közhasznú Kft., Miskolc, pp. 235-250, ISBN 978-963-88345-3-9, 2011.
12. Maros, B. M., Fazekas A., Barkóczy, P., Szeghalmy, Sz., Koncsik, Zs.: **Qualifying glass surfaces by scratch test with integrated image processing**, Key Engineering Materials Vol. 413. online at <http://www.scientific.net>, Trans Tech Publications, Switzerland, 2009. pp 267-274.

KÖNYVEK

13. Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., K.-né Fótos R., K.L-né Koncsik Zs.: **Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből**, szerk: Dr. Lukács János, Miskolci Egyetem, ISBN 978-963-358-000-4

TANULMÁNYOK

14. Kaulics N., Koncsik Zs., Kovács P., Lukács Zs., Maros B. M., Tisza M.: **Anyagjellemzők adatbázisának kidolgozása anyagtechnológiai folyamatok végelesemes modellezéséhez**, ME MTT OTKA NI 61724 tanulmány, pp 1-64. Miskolc, 2007.

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZATOK ÉS ELŐADÁSOK

15. Koncsik Zs.: **A Szikszói Kistérség településeinek fenntartható fejlesztése**, 2007. 05. 02. ROP 3.3.1-2005-02-0014/31 jelű projekt, Sátoraljaújhely
16. Koncsik Zs. **Túravezető a Zempléni-hegységbe**, XXVII. OTDK, 2005. 03. 22. Budapest, Tudománytörténet és Természeti Örökségek szekció, pp 47. Resume kötet pp 261.
17. Koncsik Zs. **Túravezető a Zempléni-hegységbe**, TDK konferencia, Miskolci Egyetem, Természetvédelmi szekció, pp 47. 2004. 11. 18.

KONZULTÁLT SZAKDOLGOZATOK, TDK DOLGOZATOK

18. Németh Alexandra Kitti: **Betonok szivattyúzhatóságának vizsgálata**, BSc gépészmérnök hallgató, beadta: 2012. november 30. Tervezésvezető: Marosné Berkes Mária, Konzulens: Kuzsella Lászlóné Koncsik Zsuzsanna
19. Varga Péter: **Látszó betonok minőségi követelményei és alkalmazhatóságának lehetőségei**, műszaki menedzser hallgató, beadta: 2012. május 11., pp. 51. Tervezésvezető: Kuzsella Lászlóné Koncsik Zsuzsanna, Konzulens: Marosné Berkes Mária
20. Szöllösi Katalin: **Acél csővezetékek korrózióvédelme polimer bevonattal**, műszaki menedzser hallgató, beadta: 2011. november 28. pp.: Tervezésvezető: Lukács János, konzulens: Koncsik Zsuzsanna

7. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] F. L. Riley: *Silicon Nitride and Related Materials*, Journal of the American Ceramic Society 83, 2, 2000.
- [2] D. W. Richerson: *Modern Ceramic Engineering. Properties, Processing, and Use in Design*. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc. 1992. ISBN 0-8247-8634-3
- [3] J. F. Yang, T. Ohji, T. Sekino, C.L. Li, K. Niihara: *Phase transformation, microstructure and mechanical properties of Si₃N₄/SiC composite*, Journal of the European ceramic Society 21, pp. 2179-2183. 2001.
- [4] K.T. Hwang, C. S. Kim, K.H. Auh, D.S. Cheong, K. Niihara: *Influence of SiC particle size and drying method on mechanical properties and microstructure of Si₃N₄/SiC nanocomposite*, Materials Letters 32 pp. 251-257. 1997.
- [5] M. Hnatko, D. Galusek, P. Sajgalik: *Low-cost preparation of Si₃N₄-SiC micro/nano composites by in-situ carbothermal reduction of silica in silicon nitride matrix*, Journal of the European Ceramic Society 24, pp. 189-195. 2004.
- [6] M. Kasiarova, E. Rudnayova, J. Dusza, M. Hnatko, P. Sajgalik, A. Merstallinger, L. Kuzsella: *Some tribological properties of a carbon-derived Si₃N₄/SiC nanocomposite*, Journal of the European Ceramic Society 24. pp. 3431–3435. 2004.
- [7] J. Dusza, J. Morgiel, A. Duszová, L. Kvetková, M. Nosko, P. Kun, Cs. Balázsi: *Microstructure and fracture toughness of Si₃N₄ + graphene platelet composites*, Journal of the European Ceramic Society 32. pp.3389–3397. 2012.
- [8] P. Sajgalik, M. Hnatko, F. Lofaj, P. Hvizdos, J. Dusza, P. Warbichler, F. Hofer, R. Riedel, E. Lecomte, M.J. Hoffmann: *SiC/Si₃N₄ nano/micro-composite - processing, RT and HT mechanical properties*, Journal of the European Ceramic Society 20, pp. 453-462, 2000.
- [9] P. Sajgalik, M. Hnatko, F. Lofaj, P. Hvizdos, J. Dusza, P. Warbichler, F. Hofer, R. Riedel, E. Lecomte, M.J. Hoffmann: *SiC/Si₃N₄ nano/micro-composite - processing, RT and HT mechanical properties*, Journal of the European Ceramic Society 20, pp. 453-462, 2000.
- [10] C. Tian, H. Jiang, N. Liu: *Thermal shock behavior of Si₃N₄-TiN nano-composites*, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 29. pp.14–20. 2011.
- [11] G. Zheng, J. Zhao, C. Jia, X. Tian, Y. Dong, Y. Zhou: *Thermal shock and thermal fatigue resistance of Sialon-Si₃N₄ graded composite ceramic materials*, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 35. pp. 55–61. 2012.
- [12] N.N. Long, J.-Q. Bi, W.-L. Wang, M. Du, Y.-J. Bai: *Mechanical properties and microstructure of porous BN-SiO₂-Si₃N₄ composite ceramics*, Ceramics International 38. pp. 2381–2387, 2012.
- [13] A. Kovalcikova, Cs. Balázsi, J. Dusza, O. Tapasztó: *Mechanical properties and electrical conductivity in a carbon nanotube reinforced silicon nitride composite*, Ceramics International 38 pp. 527–533, 2012.
- [14] Q. Li, X. Yin, L. Feng: *Dielectric properties of Si₃N₄-SiCN composite ceramics in X-band*, Ceramics International 38. pp. 6015–6020, 2012.

- [15] F. Ye, L. Zhang, X. Yin, X. Zuo, Y. Liu, L. Chenga: *Fabrication of Si₃N₄-SiBC composite ceramic and its excellent electromagnetic properties*, Journal of the European Ceramic Society 32. pp. 4025–4029, 2012.
- [16] Kh.V. Manukyan, S.L. Kharatyan, G. Blugan, P. Kocher, J. Kuebler: *MoSi₂-Si₃N₄ composites: Influence of starting materials and fabrication route on electrical and mechanical properties*, Journal of the European Ceramic Society 29. pp. 2053–2060, 2009.
- [17] X. Li, X. Yin, L. Zhang, L. Cheng, Y. Qi: *Mechanical and dielectric properties of porous Si₃N₄-SiO₂ composite ceramics*, Materials Science and Engineering A 500 pp. 63–69, 2009.
- [18] Csanády Andrásné, Kálmán Erika, Konczos Géza: *Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába*, MTA Kémiai Kutatóközpont, ELTE EÖTVÖS KIADÓ, ISBN 978 963 284 053 6, 2009.
- [19] O. Tapasztó: *Szén nanoszerkezetekkel adalékolt szilícium-nitrid nanokompozitok*, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Budapest, 2012.
- [20] O. Tapasztó, Cs. Balázsi: *The effect of milling time on the sintering kinetics of Si₃N₄ based nanocomposites*; Ceramics International 36. pp. 2247–2251.; 2010
- [21] K. K. Chawla: *Ceramic Matrix Composites*, Chapman & Hall, ISBN 0412 36740 8, 1993.
- [22] M. Kasiarova, E. Rudnayova, J. Dusza, M. Hnatko, P. Sajgalik, A. Merstallinger, L. Kuzsella: *Some tribological properties of a carbon-derived Si₃N₄/SiC nanocomposite*, Journal of the European Ceramic Society 24. pp. 3431–3435. 2004.
- [23] P. Hvizdos; V. Puchy; A. Duszová; J. Dusza; Cs. Balázsi: *Tribological and electrical properties of ceramic matrix composites with carbon nanotubes*, Ceramics International, Volume 38, Issue 7. pp. 5669-5676, 2012.
- [24] Cs. Balázsi, B. Fényi, N. Hegman, Zs. Kövér, F. Wéber, Z. Vértesy, Z. Kónya, I. Kiricsi, L. P. Biró, P. Arató: *Development of CNT/Si₃N₄ composites with improved mechanical and electrical properties*; Composites: Part B 37, pp.: 418–424; 2006.
- [25] R. Lörcher: *Verschleiß und Gefügeeigenschaften keramischer Schneidwerkstoffe*, PhD. értekezés, 1990.
- [26] G. W. Stachowiak: *Wear. Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN-13: 978-0-470-016-28-2, 2006.
- [27] S. M. Hsu, M. C. Shen, T. N. Ying, Y. S. Wang, S. W. Lee: *Tribology of silicon-based ceramics*; Ceramics Division in B. W. Sheldon, S. C. Danforth: *Silicon-Based Structural Ceramics*, The American Ceramic Society; ISBN 0-944904-76-9, 1994.
- [28] E. Vámos: *Tribológiai kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1983. ISBN: 963 10 4976 0
- [29] I. Valasek: *Tribológia 1 – A tribológiai alapjai*, Tribotechnik Kft. Budapest, ISBN 963 00 8688 3; 2002.
- [30] Kragelszkij-Mihin: *Gépszerkezetek súrlódás-és kopásszámítása*, Műszaki Könyvkiadó, 1987., ISBN: 963 10 7127 8

- [31] B. Bhushan: *Modern Tribology Handbook*, Volume One, CRC Press, ISBN0-8493-8403-6, 2001.
- [32] K. Kato: *Classification of Wear Mechanism /Models, Wear, Materials, Mechanism and Practice*, Tribology in Practice Series, Editor: Stachowiak, 2005. John Wiley & Sons Inc., ISBN-13: 978-0-470-01628-2
- [33] C. X. Li: *Wear and Wear Mechanisms*, (The University of Birmingham, UK, előadás)
- [34] I.M. Hutchings: *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, ISBN 0-340-56184-x Edward Arnold A Division of Hodder & Stoughton, pp:77-78. 1992.
- [35] S. C. Lim, M. F. Ashby: *Wear –mechanism maps*, Acta metall. Vol. 35. No. 1. pp. 1-24., Overview No. 55. 1987.
- [36] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor: *Engineering tribology*, Second edition, ISBN 0-7506-7304-4, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [37] *Verschleiss; Begriffe, Systemanalyse von Verschleissvorgängen; Gliederung des Verschleissgebietes*, DIN 50320, 1979.
- [38] *Tribologie, Prüfung von Reibung und Verschleiß*, DIN 50 324, 1992.
- [39] *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics), Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method*, ISO 20808, 2004.
- [40] *Geometrical product specifications (GPS) Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*, DIN EN ISO 4287, 2009.
- [41] *Geometrical product specifications (GPS) Surface texture: Areal – Part 2.: Terms, definitions and surface texture parameters*, ISO 25178-2, 2012.
- [42] *DIN 50359-1: Universalhärteprüfung, Teil 1: Prüfverfahren*,. 1997. Oktober.
- [43] *Standard Test Method for Microhardness of Materials*, ASTM szabvány E384-84.
- [44] *Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics* ASTM C1327-03
- [45] *Advanced Technical Ceramics, Monolithic Ceramics, Mechanical Properties at Room Temperature, Part 4: Vickers, Knoop and Rockwell Superficial Hardness*. CEN ENV 843-4