



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Műszaki kerámia kompozitok szikrakisüléses plazmaszinterelése

Szilícium-nitrid és szilícium-karbid alapú kerámia kompozitok

Tézisfüzet

Szerző:

Bódis Eszter

Témavezető:

Dr. Szépvölgyi János DSc.

MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézet



2018

1. Bevezetés és célkitűzés

Míg a hagyományos kerámiákat már évezredek óta használják, a „korszerű műszaki kerámiák” kutatása, fejlesztése és alkalmazása csak pár évtizedes múltra tekinthet vissza. A műszaki kerámiák talán az egyik leginkább kutatott és legelterjedtebb képviselői a szilícium-nitrid (Si_3N_4) és szilícium-karbid (SiC) alapú anyagi rendszerek, amelyek nagy szilárdságukkal és keménységükkel, valamint kiváló kémiai és hőállóságukkal számos alkalmazási területen nyújtanak vonzóbb alternatívát a polimerekkel vagy fémes anyagokkal szemben.

A szilícium-nitrid (Si_3N_4) alapú kerámiákat, keménységük, szilárdságuk, kopásállóságuk, továbbá termikus és kémiai stabilitásuk miatt gázturbinákban, motoralkatrészeknél, valamint csapágyakban, fémmegmunkáló berendezésekben vágószerszámok anyagaként, illetve fémöntő berendezések és kemencék bélésanyagaként használják fel ¹. A Si_3N_4 biokompatibilis, ezért mozgásszervi és fogászati implantátumokban is alkalmazzák ². Újabb felhasználási területe a mikroelektromos kémiai érzékelők kialakítása ³.

A szilícium-karbid (SiC) alapú kerámiák rendkívül kemény, nagy szilárdságú anyagok, ezért kezdetben főként csiszolóanyagként használták fel őket. A kiváló mechanikai tulajdonságokon túlmutató kopás- és korrózióállósága miatt, különös tekintettel arra, hogy e tulajdonságait magas hőmérsékleten is képes megőrizni, ma már fémmegmunkáló szerszámokat, járművek nagy teljesítményű féktárcsáit és fékbetéteit szintén SiC -ből készítik ⁴. A SiC elektrolumineszcens tulajdonságú ⁵, így a félvezető iparban is széles körben alkalmazzák. Kiváló hővezetőképessége miatt mikroelektronikai alkatrészek tokozására is használják. Biokompatibilitása és kémiai inertsége következtében pedig orvosi és biológiai eszközökben is használatos.

Előnyös mechanikai és kémiai tulajdonságaik mellett a Si_3N_4 és SiC kerámiák a húzó és ütő igénybevételeket kevésbé bírják. Noha az utóbbi időkben a rájuk vonatkozó ismeretek bővülésének és az anyagtudományi és anyagtechnológiai módszerek fejlődésének eredményeként e tulajdonságok is javultak, a belőlük készített monolit kerámiák azonban még mindig elég

¹ R. F. Riley, „Silicon Nitride and Related Materials,” *Journal of the American Ceramic Society*, 8.kötet, pp. 245-265, 2000.

² P. R. Hernandez, C. Taboada és L. Leija, „Evaluation of biocompatibility of pH-ISFET materials during long-term subcutaneous implantation,” *Sensors and Actuators B*, pp. 133-138, 1998.

³ R. Kue, A. Sohrabi és D. Nagle, „Enhanced proliferation and osteocalcin production by human osteoblast-like MG-63 cells on silicon nitride ceramic discs,” *Biomaterials*, 20. kötet, pp. 1195-1201, 1999.

⁴ W. Dressier és R. Riedel, „Progress in Silicon-Based Non-Oxide Structural Ceramics,” *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 15. kötet, pp. 13-47, 1997.

⁵ H. J. Round, „A note on Carborundum,” *Electrical World*, 19. kötet, pp. 309, 1907.

ridegek és külső terhelések hatására adott esetben katasztrófászerűen törhetnek. A vonatkozó kutatások szerint az adott kerámiák szívóssága egyrészt az összetétel és a mikroszerkezet szabályozásával, vagyis a töréshez vezető kritikus feszültségócok kiküszöbölésével, másrészt a külső terhelés káros hatását csökkentő erősítőfázisok beépítésével, azaz társított kerámiák, ún. kerámia kompozitok létrehozásával javítható.

A kerámiák mechanikai tulajdonságai tehát javíthatók a mikroszerkezet megfelelő szabályozásával, amelynek egyik újszerű módja, ha a mikroszerkezet kialakítását célzó hőkezelést ún. szikrakisüléses plazmaszintereléssel (spark plasma sintering, SPS) végezzük. Az SPS eljárásnál a szinterelendő anyag szemcséi között szaggatott egyenárammal létrehozott, mikro-kisülések keletkeznek, emiatt ez a módszer az eddig alkalmazott eljárásoknál gyorsabb és hatékonyabb hőátadást tesz lehetővé⁶. A belső, intenzív hőközlés miatt az adott kerámia a hagyományos szinterelésnél alacsonyabb hőmérsékleten és lényegesen rövidebb idő alatt tömöríthető. Ily módon a mikroszerkezet jobban szabályozható, és lehetőség van nanoszerkezetű kerámiai anyagok kialakítására is.

A kerámiák szerkezetének szívósítására, ezáltal a mechanikai tulajdonságainak javítására a másik, általánosan alkalmazott módszer erősítőfázisok beépítése a kerámia mátrixba. Erősítőanyagként többféle anyagok használatosak. Ilyen lehet például a már régóta használt szemcsés cirkónium-dioxid (ZrO_2), amely egyrészt térbelileg akadályozhatja a kerámia mátrixban terhelés hatására kialakuló feszültség terjedését, másrészt terheléskor fázisátalakuláson mehet át, ami miatt ún. fázisváltó szívósításra képes⁷. Hasonlóan előnyös hatású, ugyanakkor újszerű adalékanyag lehet a ZrO_2 nanoszál, amely összetett módon növelheti a kompozitok töréssel szembeni ellenállását. Az anyagtudományi kutatások központi témái közé tartoznak a grafén-alapú rendszerek vizsgálatai. A grafén kiváló mechanikai tulajdonságai miatt szintén a társított kerámiák egy lehetséges erősítőanyaga⁸. Számos példa igazolja, hogy a grafén beépítése javíthatja különböző kompozitok mechanikai, hőtechnikai és elektromos tulajdonságait egyaránt⁹.

⁶ M. Suárez, A. Fernández, J. L. Menéndez, R. Torrecillas, H. U. Kessel, J. Hennicke, R. Kirchner és T. Kessel, „Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials,” in *Sintering Applications*, InTech, 2013.

⁷ B. Basu és K. Balani, *Advanced Structural Ceramics*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

⁸ L. S. Walker, V. R. Marotto, M. A. Rafiee, N. Koratkar és E. L. Corral, „Toughening in graphene ceramic composites, *ACS Nano*, 5 (2011) 3182-3190.,” *ACS Nano*, 5. kötet, pp. 3182-3190., 2011.

⁹ S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, R. D. P. E. A. Stach, S. T. Nguyen és R.S. Ruoff, „Graphene-based composite materials,” *Nature*, 442. kötet, pp. 282, 2006.

Doktori munkámban a Si_3N_4 és SiC alapú műszaki kerámia kompozitok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai közti összefüggéseket tanulmányoztam. Mindkét mátrixanyagnál vizsgáltam a szinterelési körülmények és az erősítőfázisok beépítésének hatását a kerámiák mikroszerkezetére és ezen keresztül egyes mechanikai tulajdonságaikra. Céлом volt, hogy olyan újszerkezetű kerámia nanokompozitok kifejlesztésének megalapozásához járuljak hozzá, amelyek tulajdonságai jobbak az eddig ismert kerámia kompozitokénál.

2. Kísérleti és vizsgálati módszerek

2.1. Erősítőfázisok előállítása

ZrO_2 nanoszálak előállítására az egyik legelterjedtebb módszer az elektrosztatikus szálképzés (electrospinning), amellyel egyszerűen és olcsón lehet nanoméretű szálakat nagy mennyiségben gyártani. Kísérleti munkám során laboratóriumi körülmények között, elektromos szálhúzással készítettem 3 mol% Y_2O_3 -dal részlegesen stabilizált ZrO_2 nanoszálakat.

SiC és Si_3N_4 alapú kompozitok mechanikai tulajdonságainak javítására használt másik erősítőanyag, a többretegű grafén (multilayer graphene, MLG), amelyet szintén laboratóriumi körülmények között, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Vékonyréteg-fizika Osztályán nagy teljesítményű őrlőberendezésben állítottak elő¹⁰.

2.2. Kerámia kompozitok előállítása

A grafénnel erősített SiC alapú kompozitok 1 és 3 m/m%, míg a Si_3N_4 alapú társított rendszerek 1, 3 és 5 m/m% MLG-t tartalmaztak.

A ZrO_2 nanoszálal erősített rendszerekbe 5, 10 és 15 m/m% adalékanyagot építettem be. Összehasonlításként az előzőkkel azonos összetételű, ZrO_2 nanoszemcsével erősített rendszereket is előállítottam, azonos körülmények között.

Minden egyes anyagi rendszernél erősítőfázist nem tartalmazó referencia mintákat is készítettem. A kompozitok előállításakor folyadékfázisú és szilárdfázisú szinterelést elősegítő adalékanyagokat is alkalmaztam. Valamennyi mintát szikrakisüléssel plazmaszinterelő berendezésben hőkezelttem.

¹⁰ Kun, F. Wéber és C. Balácsi, „Preparation and examination of multilayer graphene nanosheets by exfoliation of graphite in high efficient attritor mill,” *Central European Journal of Chemistry*, 9.kötet, pp. 47-51, 2011.

2.3. Kerámia kompozitok anyagvizsgálata

Szerkezetvizsgálati módszerek:

A kiindulási Si_3N_4 és SiC szemcsék felületi összetételét röntgen fotoelektron spektroszkópiával (XPS), szemcseméret eloszlásukat lézeres szemcseméret analizátorral határoztam meg. A szinterelt minták relatív sűrűségét Archimédesz-féle súlytörvény figyelembevételével számoltam. A kísérleti minták fázisösszetételét röntgendiffrakciós módszerrel (XRD), mikroszerkezetüket pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) vizsgáltam. Raman spektroszkópiával vizsgáltam a szinterelés hatását a grafén szerkezetére, továbbá a ZrO_2 repedés hatására bekövetkező fázisátalakulását.

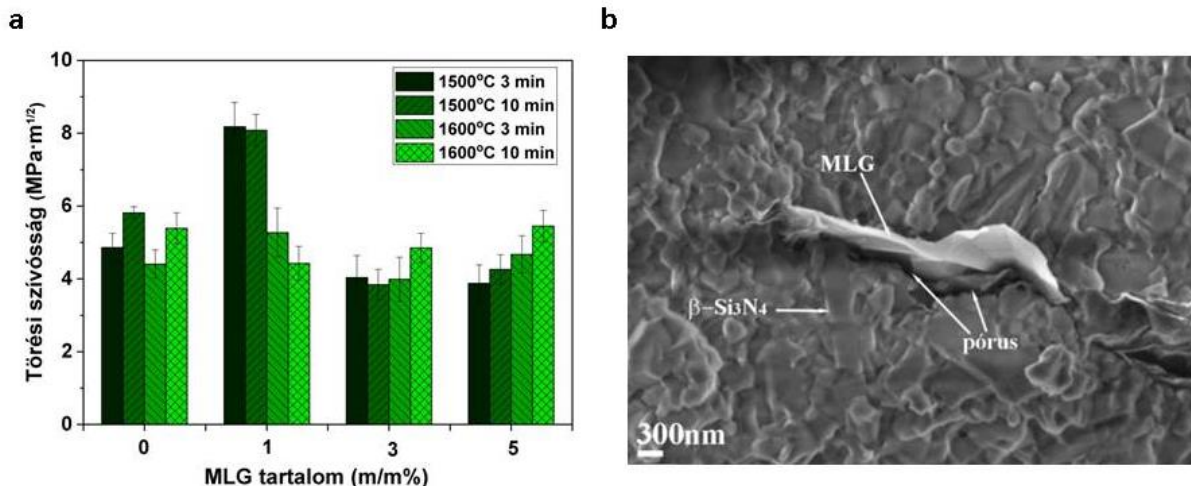
Mechanikai tulajdonságok vizsgálata:

A szinterelt kerámiatestek Vickers keménységét és Young modulusát műszeres keménységvizsgálati adatokból határoztam meg. A keménység és modulus értékek, továbbá a keménységméréskor keletkező lenyomat sarkaiban keletkező repedések hosszából a kompozitok törési szívósságát számoltam. A kompozitok hajlítószilárdságát hárompontos hajlító vizsgálattal határoztam meg.

3. Kutatási eredmények

A $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MLG}$ nanokompozitokat 1500 és 1600°C-on, 3 és 10 perc hőntartási idővel készítettem. Kimutattam, hogy az MLG beépítése javítja a $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MLG}$ nanokompozitok törési szívósságát, ami az adalékanyag homogén elosztatásával és a mátrix-erősítőfázis közötti határfelületi kölcsönhatásokkal függ össze.

Mikroszerkezeti vizsgálataim szerint 1 m/m% MLG viszonylag egyenletesen elosztható a kiindulási nyerskeverékben. A legnagyobb törési szívósságot, ami a monolit kerámiához képest 60%-os növekedést jelent, az 1 m/m% MLG-t tartalmazó, 1500°C-on hőkezelt mintánál kaptam (1. a ábra). A törési szívósság növekedése annak tulajdonítható, hogy terheléskor az MLG részben kihúzódik a szerkezetből, mint energiaelnyelő folyamat, másrészt a grafén gátolja a terheléskor kialakuló repedések terjedését. TEM vizsgálatokkal kimutattam, hogy az MLG/mátrix határfelületek mentén nanopórusok jelennek meg (1.b ábra), amelyek a hőkezeléskor, a Si_3N_4 felületén lévő SiO_2 és MLG között végbemenő reakcióra, és az ennek eredményeként kialakuló $\text{SiO} + \text{CO}$ gázelegyre utalnak. Az MLG tartalom további növelésekor az MLG lemezek már egymásba csúsznak, illetve agglomerálódnak.

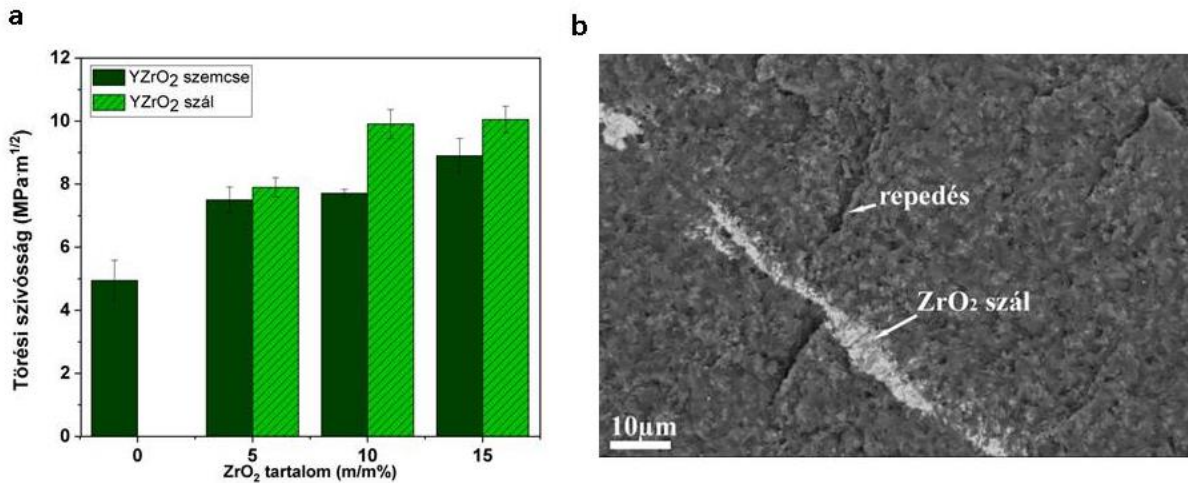


1. ábra $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MLG}$ nanokompozitok (a) törési szívósság változása az MLG függvényében;
(b) törétfelületének SEM felvétele

A 3 és 5 m/m% MLG-t tartalmazó minták mechanikai tulajdonságai részben a grafén lemezek agglomerációja, részben a lemezek mentén megjelenő pórusok növekvő száma miatt rosszabbak az 1 m/m% erősítőfázist tartalmazó mintáknál.

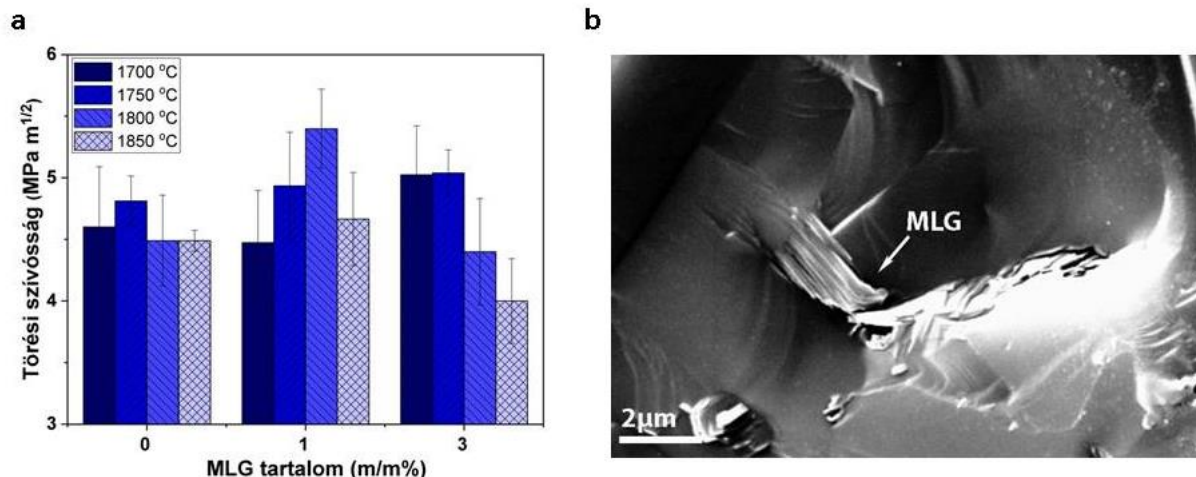
Az 1600°C-on hőkezelt 15 m/m% erősítőfázist tartalmazó **Si₃N₄/ZrO₂ nanokompozitok** mikroszerkezetének és mechanikai tulajdonságainak vizsgálata alapján szállal történő erősítéskor nagyobb törési szívósság és hajlítószilárdság érhető el, mint ZrO₂ szemcsék bevitelkor (2. a ábra).

A ZrO₂ szállal erősített Si₃N₄-alapú kompozitnál a törési szívósság több tényező miatt is javul. SEM vizsgálatokkal igazoltam, hogy a mátrixban véletlenszerűen elhelyezkedő ZrO₂ szálak a repedésekből származó feszültséget a szálak mentén képesek elvezetni (2. b ábra). Raman spektroszkópia segítségével pedig bizonyítottam, hogy a repedések közelében ébredő feszültség t→m-ZrO₂ fázisátalakulást is előidéz. Adott esetben tehát kombinált erősítő mechanizmussal állunk szemben; ennek hatására mind a törési szívósság, mind a hajlítószilárdság kétszeresére nő a referencia mintához képest.



2. ábra Si₃N₄/ZrO₂ szál nanokompozitok (a) törési szívósság változása a ZrO₂ tartalom függvényében; (b) ZrO₂ szálak szívósító mechanizmusának vizsgálata SEM- mel

Megállapítottam, hogy az 1 m/m% MLG-t tartalmazó, 1800°C-on hőkezelt **SiC/MLG kompozitok** törési szívóssága és hajlítószilárdsága közel 20%-kal javítható az erősítőfázis bevitelével (3. a ábra). A növekedés kétféle szívósító mechanizmus, a repedés áthidalás és az MLG kihúzódas együttes hatásával magyarázható (3. b ábra).



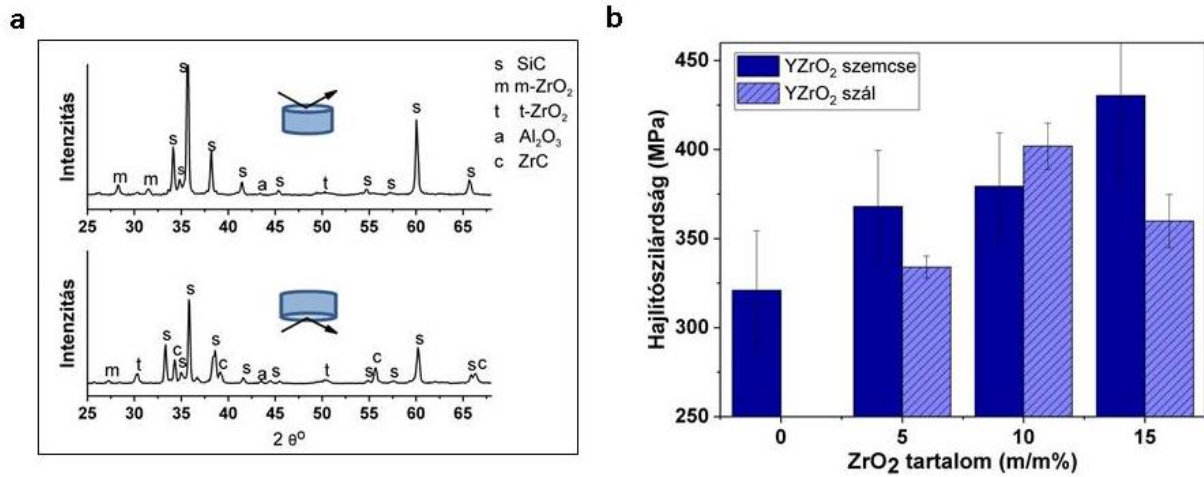
3. ábra SiC/MLG kompozitok (a) törési szívósságának változása MLG tartalom függvényében;
(b) töretfelületének SEM felvételei

Az MLG tartalmat 3 m/m%-ra növelve a grafén lemezek agglomerálódnak, és szintereléskor részben grafittá alakulnak át. Ugyanakkor 3 m/m% MLG tartalom mellett a SiC kompozit gyakorlatilag pórusmentesre szinterelhető; ennek eredményeként a társított kerámia keménysége 17%-kal javult az ugyanolyan körülmények között előállított monolit kerámiához képest. Mikroszerkezeti vizsgálataim alapján a keménység növekedéséhez a mátrix-erősítőfázis határfelületeken megjelenő B_4C is hozzájárult, amely a szinterelést elősegítő bór adalékanyag és a grafén között lejátszódó reakció során alakult ki.

Vizsgálataim szerint a **SiC/ZrO₂ szál** és **SiC/ZrO₂ szemcse kompozitok** 1700°C-on történő SPS kezelésekor komplex folyamatok játszódnak le: a minták alsó részén ZrC mutatható ki, míg a felső részen nincs jelen ZrC (4. a ábra). A ZrC a ZrO₂ és SiC között, 1750°C körül lejátszódó reakcióban alakul ki, így valószínűsíthető, hogy plazmaszintereléskor a minták alsó és felső részének hőmérséklete eltérő: az alsó részén magasabb a hőmérséklet, mint a felsőn. Mikroszerkezeti vizsgálataim kimutatták, hogy a ZrC kialakulása a minták alsó részén feltehetően $c\text{-ZrO}_2 \rightarrow c\text{-ZrC}$ izostrukturális átalakulással játszódik le.

A ZrO₂ erősítőfázis bevitele a SiC/ZrO₂ kompozitoknál is javítja a mechanikai tulajdonságokat, de ez esetben ZrO₂ szemcsék kedvezőbb hatásúak voltak a ZrO₂ szálaknál.

Ennek oka, hogy szemcsés erősítéskor a mátrix és az erősítőfázis közötti reakció körülmények valamelyest előnyösebbek a ZrC kialakulásnak, ami kedvezően hat a mechanikai tulajdonságokra: a ZrC megjelenése ugyanis javította a kompozitok keménységét, rugalmassági modulusát és hajlítószilárdságát is (4. b ábra).



4. ábra SiC/ZrO₂ kompozitok (a) mikroszerkezeti; (b) mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Doktori munkám során olyan Si₃N₄ és SiC alapú társított kerámiákat sikerült előállítani, amelyek a monolit kerámiákhoz képest jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Sikerült tisztáznom a mechanikai tulajdonságok és a mikroszerkezet között kapcsolatrendszer egyes részleteit is. Reményeim szerint ezzel hozzájárultam az adott anyagi rendszerekkel kapcsolatos ismereteink bővítéséhez, ezáltal jobb minőségű, szélesebb körben alkalmazható, korszerű műszaki kerámiák gyártásának megalapozásához.

4. Tézispontok

1. Összefüggést állapítottam meg a többrétegű grafén (MLG) erősítőfázist tartalmazó, Si_3N_4 mátrixú társított kerámiák mikroszerkezete és mechanikai tulajdonságai között. Mikroszerkezeti vizsgálataim szerint az MLG a kompozitok terhelésekor egyrészt gátolja a mátrixban kialakuló repedések terjedését, másrészt a mátrixtól elválva kihúzódhat a szerkezetből, ezáltal csökkenti a mátrixban kialakult feszültséget. A két folyamat együttes hatásaként növekszik a társított kerámia törési szívóssága: a szikrakisüléses plazmaszintereléssel 1500°C -on hőkezelt, 1 m/m% MLG-t tartalmazó Si_3N_4 mátrixú kompozit törési szívóssága közel másfélszerese volt az ugyanolyan körülmények között előállított, erősítőfázist nem tartalmazó referencia mintánál. (I. közlemény)

2. Kimutattam, hogy a 3, illetve 5 m/m% MLG tartalmú Si_3N_4 /MLG nanokompozitokban a grafén lemezek agglomerálódnak, és szinterelés során a lemezek felületén nanopórusok száma is növekszik. Emiatt romlik az erősítőanyag és mátrix közötti határfelületi kölcsönhatás, ami a társított kerámia mechanikai tulajdonságai nem térnek el a referencia mintákétól. (I. közlemény)

3. Elsőként állítottam elő ZrO_2 szállal erősített, Si_3N_4 mátrixú, SPS módszerrel hőkezelt kompozit kerámiákat. Kimutattam, hogy a ZrO_2 adalékkal kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat érünk el a Si_3N_4 -ben. A ZrO_2 tartalom növekedésével a mechanikai tulajdonságok fokozatosan javulnak. A 15 m/m% ZrO_2 szálal tartalmazó minták törési szívóssága és hajlítószilárdsága jobb az ugyanolyan körülmények között előállított, 15 m/m% ZrO_2 szemcséket tartalmazó mintákénál. Bizonyítottam, hogy a Si_3N_4 -be beépített ZrO_2 nanoszálak mechanikai tulajdonságokra gyakorolt kedvező hatása két, egymással kombinálódó, összetett folyamatnak tulajdonítható. A ZrO_2 szálak egyrészt a repedésekből származó feszültséget mechanikai úton, a repedés áthidalásával és elhajlításával vezetik el, másrészt terhelés hatására energiafelvétellel járó $t \rightarrow m$ - ZrO_2 fázisátalakuláson mennek át. (II. közlemény)

4. Megállapítottam, hogy a SiC alapú társított kerámiák mechanikai tulajdonságai javíthatók többrétegű grafén erősítőfázis bevitelével. Az 1 m/m% grafént tartalmazó SiC mátrixú, 1800°C -on hőkezelt kompozit törési szívóssága és hajlítószilárdsága mintegy 20%-kal nagyobb volt az erősítőfázist nem tartalmazó, hasonló körülmények között előállított referencia mintánál. Az MLG kedvező hatása repedés áthidalásával és az MLG terhelés hatására történő kihúzódásával függ össze. (III. közlemény)

5. Bizonyítottam, hogy megfelelő körülmények (3 m/m% MLG tartalom, 1850°C szinterelési hőmérséklet) esetén a SiC/MLG kompozit gyakorlatilag pórusmentes mikroszerkezetűvé szinterelhető. A monolit kerámiánál nagyobb Vickers keménység részben a pórusmentes szerkezetnek, részben a mátrix-erősítőanyag határfelületén megjelenő új reakciótermékek, a B₄C-nak tulajdonítható. (III. közlemény)

6. Elsőként vizsgáltam és hasonlítottam össze SPS módszerrel előállított, SiC/ZrO₂ szál és SiC/ZrO₂ szemcse kompozitok mikroszerkezetét és mechanikai tulajdonságait. Kimutattam, hogy ha a hőkezelést 1700°C-on végezzük, a szinterelő berendezés hossz tengelye mentén, a SiC/ZrO₂ kompozitok alsó és felső részének mikroszerkezete egymástól eltér. A minták alsó részén a ZrO₂ és a SiC közötti reakcióban képződő ZrC mutatható ki, míg a felső részen ZrC nem detektálható. A ZrC helyi megjelenése arra utal, hogy szintereléskor a minta alsó és felső része között hőmérsékletkülönbség alakul ki: az alsó részen magasabb a hőmérséklet, mint a felsőn. (IV. közlemény)

7. Bizonyítottam, hogy a SiC alapú társított kerámiák mechanikai tulajdonságai javíthatók ZrO₂ erősítőfázis bevitelével. A javulás mértéke függ az erősítőfázis morfológiájától: a ZrO₂ szemcsék előnyösebbek, mint a ZrO₂ szálak. Ez annak tulajdonítható, hogy szemcseerősítéskor kedvezőbb a mátrix és az erősítőfázis közötti, ZrC képződést eredményező reakció; a ZrC megjelenése pedig javítja az egyes kompozitok Vickers keménységét, Young modulusát és hajlítószilárdságát. (IV. közlemény)

5. Közlemények

Az értekezés témájában megjelent angol nyelvű közlemények

- I. Bódis E., Tapasztó O., Károly Z., Fazekas P., Klébert Sz., Keszler A. M., Balázs K., Szépvölgyi J., Spark plasma sintering of Si₃N₄/multilayer graphene composites, ***OPEN CHEMISTRY* 13**:(1) pp. 484-489. (2015) (IF₂₀₁₅:1,207, független hivatkozások száma: 6)
- II. Bódis E., Molnár K., Mucsi A., Károly Z., Móczó J., Klébert Sz., Keszler A. M., Fazekas P., Szépvölgyi J., Silicon nitride-based composites reinforced with zirconia nanofibres, ***CERAMICS INTERNATIONAL* 43**: pp. 16811-16818. (2017) (IF₂₀₁₆: 2,986, független hivatkozások száma: 1)
- III. Bódis E., Cora I., Balázs Cs., Németh P., Károly Z., Klébert Sz., Fazekas P., Keszler A. M., Szépvölgyi J., Spark plasma sintering of graphene reinforced silicon carbide ceramics, ***CERAMICS INTERNATIONAL* 43**:(12) pp. 9005-9011. (2017) (IF₂₀₁₆: 2,986, független hivatkozások száma: 3)
- IV. Bódis E., Fábíán Á., Bán K., Károly Z., Klébert Sz., Keszler A. M., Fazekas P., Szépvölgyi J., Microstructure and sintering mechanism of SiC ceramics reinforced with nanosized ZrO₂, ***EUROPEAN CHEMICAL BULLETIN* 6**:(11) pp. 484-490. (2017) (IF:0)

Angol nyelvű előadások:

1. Conference for Young Scientists in Ceramics, The Tenth Students' Meeting (SM-2013), Novi Sad, Serbia (2013)
2. 15th International Conference of European Ceramics Society, Student Speech Contest, Budapest (2017)

Magyar nyelvű előadások:

1. „XIII. PhD hallgatók anyagtudományi napja.”MTA Műszaki Kémiai Tudományos Bizottság, Anyagtudományi és Szilikátkémiai Munkabizottsága, Pannon Egyetem, Veszprém (2013)
2. „XV. PhD hallgatók anyagtudományi napja.”MTA Műszaki Kémiai Tudományos Bizottság, Anyagtudományi és Szilikátkémiai Munkabizottsága, Pannon Egyetem, Veszprém (2015)
3. Szilikátipari Tudományos Egyesület Finomkerámiai szakmai nap, MTA TTK, Budapest (2015)
4. Változatok Négy Intézetre: Doktori Konferencia, MTA TTK, Budapest (2016)

Poszterek:

- Eszter Bódis, Orsolya Tapasztó, Csaba Balázs, Zoltán Károly, János Szépvölgyi: Spark plasma sintering of Si₃N₄/multilayer graphene composites , 5th Central-European Symposium on Plasma Chemistry, Balatonalmádi (2013)

- Eszter Bódis, Orsolya Tapasztó, Csaba Balázsi, Zoltán Károly, János Szépvölgyi: Spark plasma sintering of Si₃N₄/multilayer graphene composites, IX. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese (2013)
- Eszter Bódis, Zoltán Károly, László Szabó, Kolos Molnár, János Szépvölgyi: ZrO₂ nanofiber reinforced Si₃N₄ structural ceramic, 14th International Conference of European Ceramics Society, Toledo, Spanyolország (2015)
- Eszter Bódis, Zoltán Károly, János Szépvölgyi: Graphene reinforced SiC ceramics sintered by Spark Plasma Sintering, Oláh György Doktori Konferencia Budapest (2015)
- Eszter Bódis, Zoltán Károly, János Szépvölgyi: Graphene reinforced SiC ceramics sintered by Spark Plasma Sintering International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, Florida, USA (2016)
- Eszter Bódis, Kolos Molnár, Anna Mária Keszler, Szilvia Klébert, Péter Fazekas, Zoltán Károly, János Szépvölgyi: Novel ceramics reinforced with ZrO₂ nanofibers 15th International Conference of European Ceramics Society, Budapest (2017)

További, témához szorosan nem kapcsolódó angol nyelvű közlemények:

Marosné B. M., Németh A. K., Károly Z., Bódis E., Maros Zs., Tapasztó O., Balázsi K., Tribological characterisation of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology, *TRIBOLOGY INTERNATIONAL* **93**:(Part A) pp. 269-281. (2016)

Klébert Sz., Balázsi Cs., Balázsi K., Bódis E., Fazekas P., Keszler A. M., Szépvölgyi J., Károly Z., Spark plasma sintering of graphene reinforced hydroxyapatite composites, *CERAMICS INTERNATIONAL* **41**:(3 (Part A)) pp. 3647-3652. (2015)

Károly Z., Klébert Sz., Bódis E., Sajó I., Szépvölgyi J., Spark Plasma Sintering of Plasma Synthesized Nanosized SiC Powder, *EUROPEAN CHEMICAL BULLETIN* **3**:(2) pp. 157-160. (2014)

Fazekas P., Bódis E., Keszler A. M., Czégény Zs., Klébert Sz., Károly Z., Szépvölgyi J., Decomposition of Chlorobenzene by Thermal Plasma Processing, *PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING* **33**:(4) pp. 765-778. (2013)

További, témához nem kapcsolódó angol nyelvű közlemények:

Fazekas P., Czégény Zs., Mink J., Szabó P. T., Keszler A. M., Bódis E., Klébert Sz., Szépvölgyi J., Károly Z., Decomposition of Poly(vinyl chloride) in Inductively Coupled Radiofrequency Thermal Plasma, *PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING* **38** pp: 771-790. (2018)

Keszler A. M., Fazekas P., Bódis E., Drotár E., Klébert Sz., M. Boselli, E. Ghedini, P. Sanibondi, Károly Z., Szépvölgyi J., Optical emission spectroscopic study of the synthesis of titanium boride nanoparticles in RF thermal plasma reactor *PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING* **37**:(6) pp. 1491-1503. (2017)

Fazekas P., Czégény Zs., Mink J., Bódis E., Klébert Sz., Németh Cs., Keszler A. M., Károly Z., Szépvölgyi J., Decomposition of Poly(vinyl chloride) in Inductively Coupled Radiofrequency Thermal Plasma, *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL* **302**: pp. 163-171. (2016)

Fazekas P., Keszler A. M., Bódis E., Drotár E., Klébert Sz., Károly Z., Szépvölgyi J., Optical emission spectra analysis of thermal plasma treatment of poly(vinyl chloride), *OPEN CHEMISTRY* **13**: pp. 549-556. (2015)

Klébert Sz., Keszler A. M., Sajó I., Drotár E., Bertóti I., Bódis E., Fazekas P., Károly Z., Szépvölgyi J., Effect of the solid precursors on the formation of nanosized TiBx powders in RF thermal plasma, *CERAMICS INTERNATIONAL* **40**:(3) pp. 3925-3931. (2014)

Fazekas P., Bódis E., Keszler A. M., Czégény Zs., Klébert Sz., Károly Z., Szépvölgyi J., Decomposition of Chlorobenzene by Thermal Plasma Processing, *PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING* **33**:(4) pp. 765-778. (2013)

További, témához nem kapcsolódó magyar nyelvű közlemények:

Fazekas P., Bódis E., Keszler A. M., Czégény Zs., Szépvölgyi J., Klórbenzol lebontása termikus rádiófrekvenciás plazmában, In: Jurecska L, Kiss Á (szerk.)**Környezettudományi Doktori Iskolák Konferenciája 2012**. 253 p. ,Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.30-2012.08.31. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2012. pp. 236-243.