

# SZILIKÁTTUDOMÁNY

## Társított kerámiák, *alias* kerámia kompozitok

Szépvolgyi János

MTA Kémiai Kutatóközpont,

Anyg- és Környezetkémiai Intézet

### Bevezetés

A modern iparágak teljesítőképessége nagymértékben függ attól, hogy az általuk igényelt korszerű szerkezeti és funkcionális anyagok kellő mennyiségben és megfelelő minőségben rendelkezésre állnak-e? Napjainkban óriási kereslet mutatkozik könnyű, erős, korrózióálló, magas hőmérsékleten is alkalmazható anyagok iránt.

További kíváncságot, hogy ezek az anyagok állandóan azonos minőségűek legyenek, és nagy termelékenységgel eljárásokkal lehessen őket előállítani. A belőlük készült szerkezeti elemeknek megbízhatóan, kis fenntartási igénnyel kell működniük, hatékony energiahasznosítás és mérsékelt környezeti hatások mellett. Utoljára, de nem utolsósorban, a teljes életciklusra vonatkozóan alapvető kritérium a gazdasági hatékonyság is.

A korszerű műszaki kerámiák számos olyan előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, amelyekből adódóan előnyösen használhatók fel akár szerkezeti, akár egyéb, különleges feladatot ellátó anyagként. Kopásállóak, kémiaiilag stabilisak, felületi sajátságai az alkalmazói igényeknek megfelelően módosíthatók, és még viszonylag magas hőmérsékleten is megőrzik előnyös mechanikai tulajdonságaikat. Ezenkívül képesek egyidejűleg jelentkező, ugyanakkor egymásnak ellentmondó felhasználói igények (pl. kopásállóság és nagy hővezető képesség, törési szívósság és hősokkállóság) kielégítésére [1].

A korszerű műszaki kerámiák minősége az elmúlt három évtizedben jelentősen javult, a felhasználói kívánalmak növekedésének, az anyagtudományi és anyagtechnológiai módszerek fejlődésének és a rájuk vonatkozó ismeretek bővülésének köszönhetően. 1970 óta a műszaki kerámiák szilárdsága több mint háromszorosára, a mikroszerkezetük egyenletességére jellemző Weinbull-modulusz pedig csaknem négyszeresére nőtt.

Ezzel együtt a monolit (egységes, főként polikristályos mikroszerkezetű) kerámiai termékek általában még mindig ridegek, és ennek következményeként – működés közben – katasztrófaszerű törést szenvedhetnek.

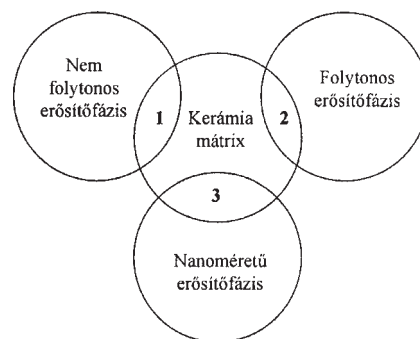
Részen e hatás csökkentését, illetve kiküszöbölését, részben további, különleges tulajdonságkombinációk ki-

alakítását teszik lehetővé a társított kerámiai anyagok, az ún. kerámia kompozitok. A mechanikai tulajdonságok elsősorban a töréshez vezető kritikus feszültségkoncentráció elkerülésével, a külső terhelést viselő és elosztó erősítőfázisok beépítésével javíthatók. Társítással, a nagy szilárdság mellett jó hőállóság biztosítható, vagy például nagyon merev, ugyanakkor ütésálló szerkezeti anyagok állíthatók elő.

Közleményünkben a tömbi fázisként kerámiai anyagot tartalmazó (kerámiamátrixú) társított anyagokról, azok tulajdonságairól, előállítási módjairól és alkalmazásairól adunk rövid áttekintést. Terjedelmi okok miatt csak a kerámia erősítőfázisú rendszerekkel foglalkozunk.

### A társított kerámiák főbb típusai

A tárgyalandó társított kerámiáknál tehát a kerámiamátrixba kerámia erősítőfázis építenek be. Az így kialakított szerkezeti anyagok magas (esetenként 1000 °C feletti) hőmérsékleten is megőrzik nagy keménységüket és szilárdságukat, ellenállóak a hirtelen hőhatásokkal szemben, kicsi a tömegük, és kedvezőek elektromos és mágneses jellemzőik; segítségükkel különleges mérnöki feladatokat lehet megoldani. A tulajdonságok célszerű kombinálhatósága az egyéb szerkezeti anyagok, például a különleges fémötvözetek komoly versenytársaivá teszi a kerámiaalapú társított anyagokat.



1. ábra. A társított kerámiák fő típusai:  
(1) nem folytonos erősítőfázisú,  
(2) folytonos erősítőfázisú, (3) nanokompozitok

A fontosabb mátrixanyagok fizikai és mechanikai jellemzői

Alkotó	Sűrűség (g·cm <sup>-3</sup> )	Olvadáspont (°C)	Young modulusz (GPa)	Hőtágulási együttható (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Törési szívósság (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,9	1850	380	7-8	1-3
MgO	3,6	2850	210	3,6	-
Mullit	3,2	2050	140	5,3	3-4
SiC	3,2	-	420	4,5	2,2-3,4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,1	-	310	3,1	2,5-3,5

A kerámia kompozitok három nagy csoportját (1) a nem folytonos erősítőfázisú, (2) a folytonos erősítőfázisú és (3) a kerámia nanokompozitok alkotják (1. ábra). A 10–100 nm (azaz 10–100·10<sup>-9</sup> m) jellemző méretű alkotórészekből álló nanokompozitok alapjában véve nem folytonos erősítőfázisú társított rendszereknek tekinthetők, az alkotóelemek méretéből adódó különleges tulajdonságaik miatt azonban indokolt ezeket külön csoportként kezelni.

A társított kerámiák mátrixanyaga akár fém-oxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, mullit, szilikátok stb.), akár más, nem-oxid jellegű anyag (SiC, BC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN stb.) lehet. Az oxidkerámiából készített rendszerek technológiai oldalról jobban megvalapozottak, egyszerűbb az alkalmazásuk, és olcsóbbak is, mint a nem-oxid alapú rendszerek.

Az oxidok közül eddig leginkább az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-t és a mullitot (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) használják mátrixként, kémiai tulajdonságaik, hőstabilitásuk, valamint amiatt, hogy jól összeilleszthetők a legelterjedtebb erősítőfázisokkal. Az utóbbi időben mind szélesebb körben alkalmazzák a nem-oxid alapú mátrixokat is, mivel kiválóak mechanikai, kémiai és hőtani jellemzőik.

A legfontosabb kerámia erősítőfázisok közé a karbidok (fém-szén vegyületek, pl. SiC, BC, TiC), a nitrdek (fém-nitrogén vegyületek, pl. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN, BN), a boridok (fém-bór vegyületek, pl. TiB<sub>2</sub>) és az oxidok (fém-oxigén vegyületek, pl. szilikátüvegek, mullit, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tartoznak. Megjelenési formáját tekintve az erősítőfázis lehet szemcsés, lemezes, túrkristályos, rövid szálas vagy hosszú szálaból álló, szövetszerű anyag.

A társított kerámiák világpiacát, csúcstechnológiai területéről lévén szó, japán és USA-beli cégek uralják. Különösen erős piaci pozíciót vívtak ki a japán vállalatok, amelyek a társított kerámiák világkereskedelméből több mint 50%-ban részesednek.

## Nem folytonos erősítőfázisú társított kerámiák: tulajdonságaik és előállításuk

A kerámia kompozitok megfelelő működése több tényezőtől, így az alkotók összetételétől, mechanikai sajátságaitól, az előállítási módszerektől, továbbá az erősítő-

Néhány erősítőfázis fizikai és mechanikai jellemzői

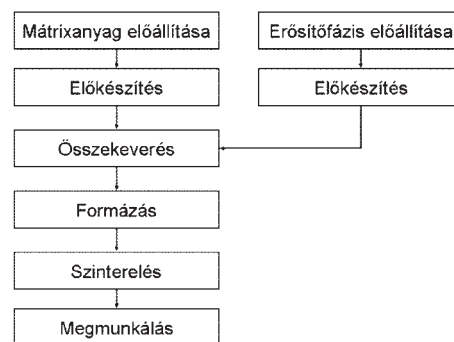
Erősítőfázis	Szálméret (μm)	Young modulusz <sup>1</sup> (GPa)	Hőtágulási együttható (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Húzó- szilárdság (GPa)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> szál	20	380	7,5	1,4
SiC túrkristály	140	430	4,0	3,5
Bórszál	100-200	385	8,3	3,8
PAN-alapú szénszál	7-10	390	0,5	2,2

<sup>1</sup> a szál tengelyével párhuzamosan

fázis és a mátrix közötti határfelület jellemzőitől függ. Néhány fontosabb mátrixalkotó fizikai és mechanikai jellemzőit az 1. táblázatban foglaltuk össze [2].

A gyakorlati szempontból legfontosabbnak tekinthető kerámia erősítőfázisok fizikai és mechanikai jellemzőit a 2. táblázat mutatja. Összehasonlítás céljából a táblázat tartalmazza egy poliakril-nitril- (PAN-) alapú szénszál jellemzőit is.

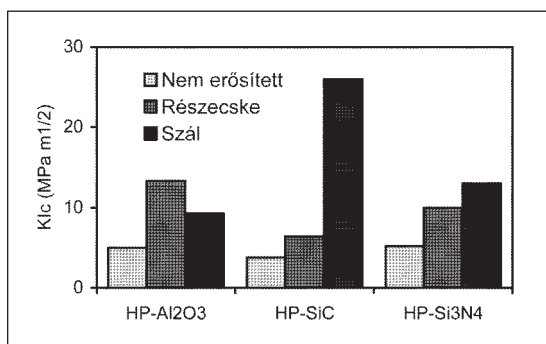
A nem folytonos erősítőfázisú társított kerámiák a monolit kerámiákhoz hasonló módon állíthatók elő (2. ábra).



2. ábra. A nem folytonos erősítőfázisú társított kerámiák előállítási technológiájának vázlatja

Az előállítás első lépése a mátrix, illetve az erősítőfázis anyagának előállítása, általában kémiai szintézissel. Csak így biztosítható ugyanis az a pontos kémiai összetétel és nagy tisztaság, valamint szabályozott mikroszerkezet, amely feltétele az előzőekben említett tulajdonságok kialakításának. Ezt követően a mátrixot alkotó kerámiaporhoz hozzákeverik az erősítőfázis szemcséit vagy túrkristályait, és a keverékből – megfelelő eljárással (sajtólással, fröccsöntéssel, szalagöntéssel stb.) – nyers formatestet alakítanak ki. A nyers testből magas hőmérsékletű hőkezeléssel (zsugorítással, szintereléssel) vagy melegsajtólással hozzák létre a készterméket. A hőkezelt kerámiát esetenként utómegmunkálásnak is alávetik, a végső méret és a felületi sajátságok pontos beállítására.

Tapasztalatok szerint az erősítőfázis morfológiája jelentősen befolyásolja a társított kerámiák mechanikai tulajdonságait. A 3. ábrán melegsajtott  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC és  $\text{Si}_3\text{N}_4$  mátrixú kerámiák, illetve belőlük készített kompozitok törési szívósságának alakulása látható. Az erősítéshez  $\text{ZrO}_2$  részecskéket ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  esetében 16%, SiC esetében 15%,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esetében 22%-ban), illetve SiC tűkristályokat (az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esetében), továbbá SiC szálat (a SiC esetében) használtak fel. Látható, hogy (i) mindhárom mátrixnál a társított anyagok törési szívóssága nagyobb, mint a monolit kerámiáé, (ii) az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mátrixnál a részecskéerősítés, míg a SiC és  $\text{Si}_3\text{N}_4$  mátrixoknál a szálerősítés javította nagyobb mértékben a mechanikai tulajdonságokat.



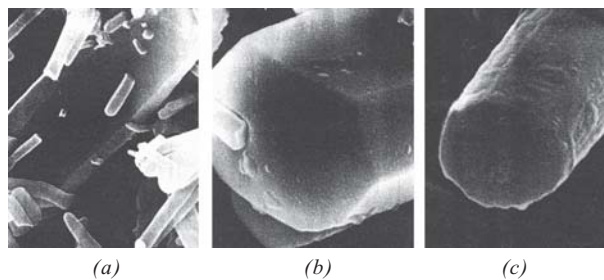
3. ábra. A részecske- és szálerősítés hatásának összehasonlítása. Részecske:  $\text{ZrO}_2$ , szál: SiC, HP: melegsajtott

A közelmúltban megjelent egyik munkában SiC lemezekkel erősített  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mátrixú társított kerámia készítéséről számolnak be [3]. 14% SiC-tartalom esetén 5  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  értékű törési szívósságot és 19 GPa-os keménységet értek el.

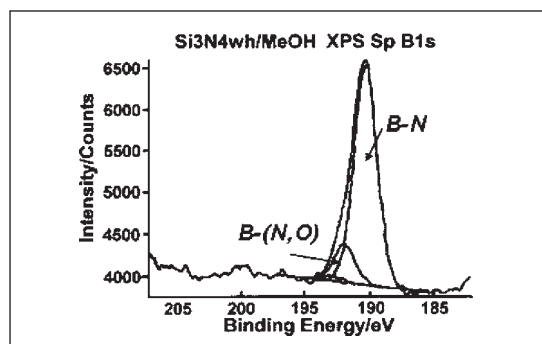
A nem folytonos erősítőfázisú kerámia kompozitok mechanikai tulajdonságai nagyban függenek az erősítőfázis szerkezeten belüli egyenletes eloszlásától. Az egyenletesség javítható az erősítőfázis felületének módosításával, például bizonyos kolloidkémiai folyamatok révén. SiC tűkristályokat tartalmazó,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  mátrixú társított anyagok törési szilárdságát közel 30%-kal növelték azáltal, hogy az alkotók összekeverését megelőzően a tűkristályok felületén szol-gél eljárással  $\text{Al}_2\text{O}_3$  réteget alakítottak ki [4].

A legösszehangoltabb mechanikai és termikus viselkedés akkor várható egy társított rendszertől, ha az erősítőfázis és a mátrix fizikai és kémiai jellemzői közel esnek egymáshoz. Jó hő- és kopásálló társított anyagot lehet készíteni például úgy, hogy  $\text{Si}_3\text{N}_4$  mátrixba  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tűkristályokat viszünk be, és az utóbbiak kedvező morfológiáját a szinterelés során is megőrizzük. Tekintettel arra, hogy a  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kerámiák csak oxidos olvadék jelenlétében zsugoríthatók, a mátrixot alkotó  $\text{Si}_3\text{N}_4$  szemcsékhez hasonlóan a tűkristályok is feloldódnak a hőkezelés során. Ezt megelőzendő, a tűkristályok felületét az oldódást kiküszöbölő védőbevonattal, például BN réteggel kell bevonni. Azt tapasztaltuk, hogy metanolos  $\text{H}_3\text{BO}_3$  oldatban vég-

zett kezelést követő ammóniás hőkezeléssel, az eredeti morfológia megtartása mellett (4. ábra), megfelelő minőségű BN védőbevonat (5. ábra) alakítható ki a tűkristályok felületén [5].



4. ábra. Az eredeti (a), a metanolos  $\text{H}_3\text{BO}_3$ -ban kezelt (b), majd  $\text{NH}_3$ -ban hőkezelt (c)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tűkristályok SEM felvételei



5. ábra. A 4. ábrán látható, (c) jelű minta XPS spektrumának részlete. A B1s csúcs felbontása döntően BN-ből álló, néhány nm vastagságú felületi réteg jelenlétét mutatja

A társított kerámiák előállításának újabb technológiai megoldásai közé tartozik az ún. *in-situ* reaktív szinterelés, amikor a végső összetételt és szerkezetet a hőkezelés során lejátszódó kémiai átalakulások alakítják ki. Így például  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ból és  $\text{BaZrO}_3$ -ból kiindulva, rétegesen elhelyezkedő  $\text{Ba}\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -ból és monoklin  $\text{ZrO}_2$ -ból álló kompozitot alakítottak ki [6]. A  $\text{Ba}\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  fázis hosszúkás kristályokból, míg a  $\text{ZrO}_2$  fázis gömbszerű szemcsékből állt. Ez a mikroszerkezet elősegítette a törések elhajlását és összekapcsolódását, ezáltal kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat eredményezett a monolit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -hoz képest. A legkedvezőbb eredményeket (nagy szilárdság, nagy törési munka és megnövelt törési szívósság) 30%  $\text{ZrO}_2$ -tartalom mellett kapták.

A szol-gél eljárások már hosszabb ideje a nem folytonos erősítőfázisú kompozitok kedvelt előállítási módszerei közé tartoznak. Alumínium-izopropoxidból és cirkónium-butoxidból például 50% amorf  $\text{ZrO}_2$ -ot és amorf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ot tartalmazó kompozit port állítottak elő [7]. A porelegyet 900 °C-on hőkezelve 5 nm átlagos szemcseméretű köbös  $\text{ZrO}_2$  fázis alakult ki. A hőmérsékletet 1100 °C-ra emelve a köbös  $\text{ZrO}_2$  egy része átalakult tetragonálissá. A végső hőkezelés után porózus szerkezetű, monoklin  $\text{ZrO}_2$ -ból és  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ból álló kompozit kerámiát kaptak.

Amennyiben a társított kerámiákba több alkotót, így boridokat, karbidokat és nitrídeket együtt építenek be, javulnak a törési sajátságok, részben a termoelasztikus jelleg növekedése, részben a törési mechanizmus megváltozása miatt. Kellően magas hőmérsékletű feldolgozáskor az egyes alkotók kémiai reakcióba is léphetnek egymással, és újszerű, oxinitrid és oxikarbonitrid fázisok alakulhatnak ki [8]. Ily módon állítottak elő az  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ - $\text{AlN}$ - $\text{SiC}_w$ -( $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{BN}$  vagy  $\text{Nb}$ ) rendszerbe tartozó, nagy szívósságú, jó korrózióállóságú és jó elektromos vezetőképességű kerámiákat. Ezeket az anyagokat anódként, fűtőelemként, érzékelőként és áramköri megszakítóként lehet használni.

### Folytonos erősítőfázist tartalmazó társított kerámiák, tulajdonságok és előállításuk

A folytonos (összefüggő) erősítőfázist tartalmazó társított anyagok a műszaki kerámiák valamennyi előnyös tulajdonságával – hő- és korrózióállósággal, kémiai stabilitással – rendelkeznek, ugyanakkor szívósak, és nagyon jó a hőszokkállóságuk is. Főalkotói megegyeznek a nem folytonos erősítőfázist tartalmazó társított kerámiáknál felsoroltakkal.

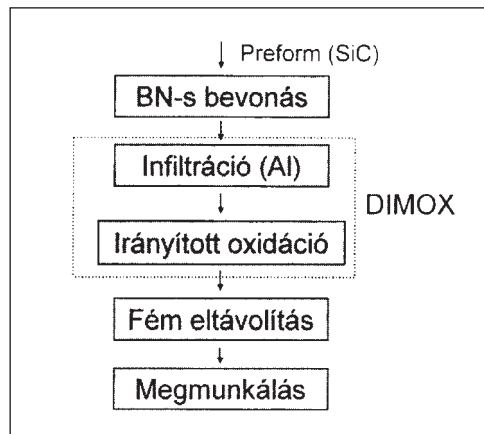
A leggyakoribb, folytonos erősítőfázisok közé az  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a mullit, a  $\text{ZrO}_2$ , a szilikátüveg, a  $\text{SiC}$ , a  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , a  $\text{BN}$ , valamint a bór- és szénszálak sorolhatók.

A folytonos erősítőfázisú társított kerámiák előállításakor először egy, a végtermék alakjának megfelelő előformát alakítanak ki az erősítőfázist alkotó kerámiaszálakból vagy -szövetekből, majd ezt építik körül a mátrix anyagával. A kerámiaszövetek tömegegységre vonatkoztatva olcsóbban állíthatók elő, és könnyebben alakíthatók ki belőlük bonyolult formák. Tekintettel arra, hogy az általában különleges körülmények között használt kompozit anyagok jellemzői nagymértékben függenek a mátrix és az erősítőfázis közötti kölcsönhatásoktól, ezeket pedig a két fázis felületi sajátságai határozzák meg, a mátrixszal való összeépítés előtt sok esetben módosítani kell az erősítőfázis felületét: erre fizikai és kémiai módszereket egyaránt használnak. Egy ilyen módszert az előzőekben már ismertettünk.

A felületen kialakított vékony réteg egyrészt megvédi az erősítőfázist a gyártás során jelentkező mechanikai és hőhatásoktól. Másfelől, a késztermék felhasználásakor jelentkező terhelések hatására ebben a felületi rétegben indulnak meg azok a mátrix és az erősítőfázis közötti szétválási folyamatok, amelyek – energiafelvétel révén – megakadályozzák a kialakult mikrorepedések tovaterjedését, ezáltal a szerkezeti elem gyors tönkremenetelét.

Az erősítőfázisból kialakított előformát speciális módszerekkel impregnálják. Ezek közül a szol-gél eljárást, a fémolvadékkal való átitatást, majd irányított oxidációt, a gőzfázisból történő kémiai leválasztást, vagy a kerámiává átalakítható polimerekkel történő bevonást alkalmazzák

leggyakrabban. A gyártás utolsó fázisa ez esetben is a mátrix összetételének, szerkezetének és a termék végső formájának kialakítása, általában magas hőmérsékleten végzett hőkezeléssel. Példaként az immár „klasszikusnak” minősíthető DIMOX eljárás [9] sémáját mutatjuk be a 6. ábrán.



6. ábra. A DIMOX eljárás vázlatja

A DIMOX eljárással kapott  $\text{SiC}_w/\text{Al}_2\text{O}_3$  társított kerámia sűrűsége  $2,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , húzószilárdsága  $262 \text{ MPa}$ , nyomószilárdsága  $450 \text{ GPa}$ , hőtágulási együtthatója  $2,7\cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$ . Jó az oxidáció- és sókorrózió-állósága, ellenáll üvegolvadékok erodáló hatásának, szívós és hőszokkálló.

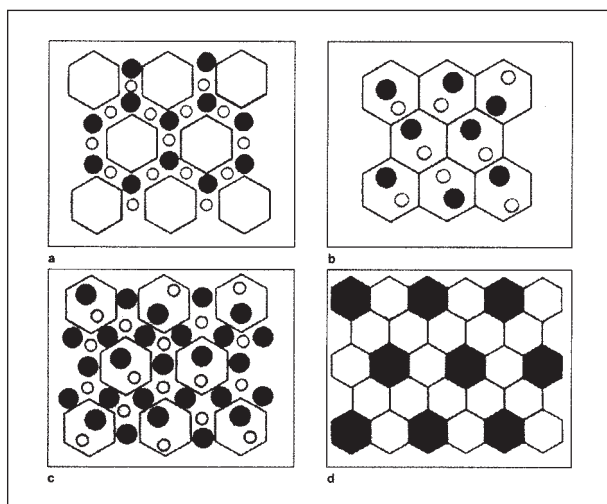
### Kerámia nanokompozitok: tulajdonságaik és előállításuk

A nanoméretű szerkezeti elemekből álló kerámia nanokompozitoknak – szerkezetük egyenletessége miatt – általában kedvezőbbek a mechanikai tulajdonságai, mint az előzőekben tárgyalt, mikroszerkezetű társított kerámiáknak. Az eddigiekben főként laboratóriumi méretekben állítottak elő ilyen anyagi rendszereket. A velük kapcsolatos ismeretek, a modellezés, az anyagvizsgálati és előállítási módszerek fejlődésével azonban már tapasztalható némi elmozdulás az ipari alkalmazás irányába.

A kerámia nanokompozitok gyakorlati szempontból jól hasznosítható osztályozása Niihara [10] nevéhez fűződik: az adott anyagcsaládot négy csoportra, a szemcsén belüli (intergranular), a szemcsék közötti (intragranular), a hibrid és a nano/nano típusú anyagokra osztotta fel (7. ábra).

A nanokompozitok nagy szerkezeti homogenitása azal együtt, hogy a mátrix és az erősítőfázis közötti kölcsönhatások technológiailag befolyásolhatók, kiváló mechanikai és hőtechnikai jellemzőket eredményez (3. táblázat). A szemcsén belüli vagy a szemcsék közötti nanokompozitok, amelyekben az erősítőfázis nanoméretű szemcséi a mátrixanyag szemcséi között vagy azok felületén található, szobahőmérsékleten 2-5-ször szilárdabbak, mint az azonos mátrixból készített monolit kerámiák. A nanokompozitok keményebbek, nagyobb a törési





7. ábra. A kerámia nanokompozitok egy lehetséges csoportosítása: (a) szemcsék közötti, (b) szemcsén belüli, (c) hibrid, (d) nano/nano típusú kompozitok

szívósságuk és a repedésekkel szembeni ellenállásuk még magasabb hőmérsékleteken is. Az energetikai alkalmazásoknál kiemelten fontos hősokkállóságuk is jobb a monolit kerámiáknál. A nanokompozitok további előnye, hogy könnyen megmunkálhatók, sőt esetenként szuperplasztikus viselkedést mutatnak.

A kerámiaalapú nanokompozitok előállításakor jellemzően 100 nm-nél kisebb szemcseméretű, többalkotós, ún.

3. táblázat

**A kerámia nanokompozitok típusai és tulajdonságai**

Típus	Tulajdonság
Szemcsén belüli kompozit	Nagy szilárdság
Szemcsék közötti kompozit	Megnövelt keménység Megnövelt törési szilárdság Jó törésállóság Jó hősokkállóság
Hibrid kompozitok	Nagy keménység Nagy törési szilárdság Jó törésállóság Jó hősokkállóság
Nano/nano kompozit	Könnyebb megmunkálhatóság Szuperplasztikus jelleg

kompozit porokból indulnak ki. A kompozit nanoporokat szol-gél eljárással, magas hőmérsékletű, önfenntartó kémiai szintézissel, vagy nagyon magas (> 2000 °C) hőmérsékleten, termikus plazmában végrehajtott kémiai átalakítással állítják elő. Néhány újabb eljárást a 4. táblázatban foglaltunk össze.

A kerámia nanokompozitok gyártásának legkritikusabb pontja, hogy a technológiai folyamatokban miként lehet megőrizni a finomszerkezet nanojellegét. Ez esetben ugyancsak a felületkémiai módszerek vezetnek célhoz. Például olyan vékony, diffúziós védőréteg alakítható ki a nanoporok felületén, amely megakadályozza, hogy a kompozit hőkezelésekor a nanoméretű szemcsék a kelleténél nagyobbra növekedjenek.

Kerámia nanokompozitok *in situ* karbotermikus redukcióval is előállíthatók [17]. SiC nanorészecskékkel erősített Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mátrixú kompozit készítésekor azt tapasztalták, hogy a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mikroszemcsék között kétféle SiC nanorészecske helyezkedik el. Az első típust azok a SiC nanoszemcsék alkotják, amelyek felületén oxigénben dús átmeneti réteg alakult ki, míg a második típusba az ilyen felületi réteget nem tartalmazó SiC nanorészecskék tartoznak. Valószínű, hogy a kétféle erősítőfázis különböző mechanikai sajátságokat is eredményez.

**A társított kerámiák felhasználási lehetőségei**

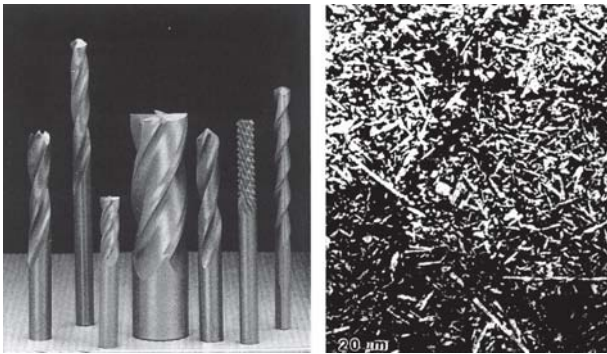
A kerámia-kerámia társított anyagokból készített szerkezeti elemeket általában extrém feltételek (magas hőmérséklet, erős eróziós és korróziós hatások, lökészerű igénybevételek) mellett használják. A kompozitok viselkedését mindenekelőtt az alapanyagok minősége, a gyártási technológiák milyensége (a tulajdonságokat befolyásoló gyártási hibák, így az összetételi és szerkezeti hibahelyek száma és eloszlása, a szerkezeti egyenetlenségek kialakulása) határozza meg. A szóban forgó anyagok ezért csak pontos folyamatvezetéssel, a technológiai fegyelem betartásával és folyamatos gyártásközi ellenőrzés mellett gyárthatók.

A nem folytonos erősítésű kerámia kompozitokat elsősorban a gépgyártásban, a repülőgépiparban, a haditechnikában, sportszerek gyártásában, az energiatermelésben, valamint egyes biokerámiák (fog- és csontpótlások) készítésére használják fel. A SiC tűkristályokkal erősített, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-

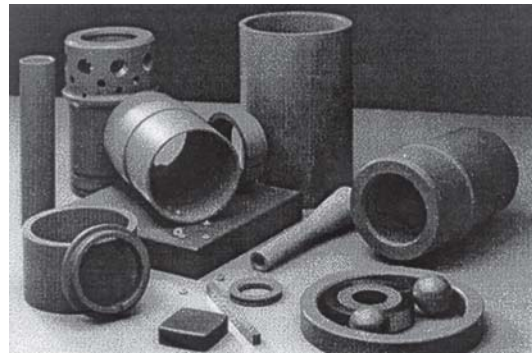
4. táblázat

**Társított nanoporok előállításának újabb módszerei**

Rendszer	Előállítási módszer	Termék	Irodalom
Különféle kerámiák	Mikrohullámú plazma	Bevont részecskék (5–20 nm)	[11]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	Önfenntartó égés	Nano/nano kristályos por	[12]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Szemcsebevonás	Bevont nanoszemcsék	[13]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC	Szol-gél + mikrohullám	Böhmittel bevont SiC	[14]
Si-C-N	Önfenntartó égés	Karbid-nitrid kompozit por	[15]
Si-C-N	Gázfázisú pirolízis	Amorf SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (100 nm)	[16]



8. ábra. SiC tűkristállal erősített  $Al_2O_3$  kerámia kompozitból készített fémmegmunkáló szerszámok és azok mikroszerkezete



9. ábra. Folytonos szálerősítésű társított kerámiából készített alkatrészek

alapú fémmegmunkáló szerszámokkal a hagyományos, keményfémalapú forgácsolószerszámokhoz képest nagyobb megmunkálási sebességgel, és a kerámia szerszámok hosszabb élettartamából adódóan, nagyobb termelékenységgel forgácsolhatók a gázturbinák gyártására felhasznált nikkel-szuperötvözetek. Néhány ilyen forgácsolószerszám és azok mikroszerkezetét bemutató pásztázó elektronmikroszkópos felvétel látható a 8. ábrán.

A SiC részecskéket tartalmazó,  $Al_2O_3$  mátrixú kerámiákból a bányászatban alkalmazható, kopásálló fúrófejeket és fúróbetéteket gyártanak. A több iparágban is alkalmazott elválasztóciklonok erős koptatóhatásnak kitett részeit, zagyszivattyúk szerkezeti elemeit, valamint erősen korrozív közegeket szállító szivattyúk kritikus részeit ugyancsak kerámia kompozitokból állítják elő. A metán reformálásánál használt, >1 MPa nyomáson üzemeltetett hőcserélőket újabban SiC/ $Al_2O_3$  társított anyagokból készítik. Az egyéb hőcserélőkkel összevetve jobb energiahasznosítás, csökkentett habképződés és alacsonyabb emisszió biztosítható ezekkel a szerkezeti anyagokkal.

A folytonos szálerősítésű kerámia kompozitok közül eddig főként az alumínium-oxid-alapúak terjedtek el, mivel ezek könnyű, szívós, a hőlékeket jól álló, oxidációnak, üvegolvadékoknak és sókorróziónak ellenálló szerkezeti anyagok. Fontosabb alkalmazási területeik: hőcserélők, különleges égőfejek, forró gázokat szűrő berendezések, valamint belső égésű motorok és gázturbinák alkatrészeinek gyártása. Felhasználásukkal hosszabb élettartam, nagyobb hatékonyság és magasabb üzemeltetési hőmérséklet biztosítható. Néhány kereskedelmi forgalomba kerülő termék látható a 9. ábrán.

A kerámia-kerámia kompozitok kiváló fizikai, mechanikai, kémiai és termikus tulajdonságai ellenére az adott anyagcsalád szélesebb körű elterjedésének és alkalmazásának számos akadálya van. Ezek elsősorban annak tudhatók be, hogy hiányosak a társított kerámiák előállításával, jellemzésével és felhasználás közbeni viselkedésével kapcsolatos ismereteink. A tulajdonságokra és az alkalmazási körülményekre vonatkozó specifikációk, a megfelelő adatbázisok és tervezési irányelvek hiánya ugyancsak behatárolja az alkalmazhatóságot. Nem tu-

dunk eleget a felhasználás közben kialakuló hibák javításának lehetőségeiről, valamint a méretnöveléssel kapcsolatos műszaki-gazdasági problémákról sem. A kompozitok magas gyártási költségei és kellően nem alátámasztott megbízhatósága miatt egyelőre mérsékelt a felhasználók bizalma is ezen anyagok iránt.

A korszerű kerámia-kerámia társított rendszerek előállításával és alkalmazási lehetőségeinek kiterjesztésével foglalkozó szakemberek tehát számos kihívással szembesülnek. Ezek közül a legfontosabbak az előállítási költségek csökkentése, a megbízhatóság növelése, a méretnövelés kapcsán jelentkező műszaki problémák megoldása, valamint a tervezési ismeretek és adatbázisok bővítése.

### Néhány gazdasági megfontolás

Adott felhasználói cél esetében a szóba jöhető, egymással versengő szerkezeti anyagok közül az alábbi módszerek valamelyikével szokás a gazdasági szempontból legkedvezőbb megoldást kiválasztani: (1) költség-hason elemzés, (2) az anyagok teljes életciklusára vonatkozó költségek elemzése, beleértve az elhasznált termékek elhelyezésének (újrahasznosításának) költségeit és (3) a beszerzési költségek összevetése. A költség-hason elemzés során egyrészt a költségtényezőkre vonatkozó információkat, másrészt az adott szerkezeti anyag alkalmazásából származó gazdasági előnyöket mérlegelik. Az utóbbival kapcsolatban a legtöbb társított kerámiánál nem állnak rendelkezésre megfelelő mélységű, részletes adatok.

Az adatbázisok hiánya nemcsak a műszaki részletekre, hanem a társított kerámiák előállításának és alkalmazásának gazdasági vonatkozásaira is érvényes. Hasonló nehézségek jelentkeznek akkor is, ha a kerámiaalapú társított anyagokat a teljes életciklusra érvényes költségek alapján vetjük össze más szerkezeti anyagokkal. A szakirodalomban ugyan már találhatók próbálkozások a probléma kezelésére, de az összehasonlítás és a teljes körű értékelés módszertana még eléggé kezdetleges stádiumban van.

A korszerű szerkezeti anyagok gyártási költségeik és/vagy beszerzési árai alapján viszonylag egyszerűen összevethetők. Az ilyenfajta értékelésnél a kerámia

kompozitok hátrányban vannak, mivel ekkor nem mérlegelhetők azok a viszonylagos előnyök, amelyek a korszerű kerámiák hosszabb élettartamából és kedvező tulajdonságaiból származnak.

A társított kerámiákkal kapcsolatos költségek a következő tételekből tevődnek össze:

- a mátrix és az erősítőfázis anyag- és gyártási költsége,
- a kompozit előállításának költsége,
- a termékek minőségének ellenőrzésével és megbízhatóságuk vizsgálatával kapcsolatos költségek,
- a kerámiai szerkezeti elemek, eszközök üzemeltetésének és fenntartásának költségei,
- az elhasznált kerámiaeszközök újrahasonosításának vagy elhelyezésének költségei.

Az egyes költségtényezők értéke és relatív súlya anyagi rendszerenként változik. Általában a kompozit előállítása jár a legnagyobb költséggel. Számottevő költségű még az alapanyagok elkészítése, valamint a késztermékek minőségének ellenőrzése.

Manapság a nem folytonos erősítésű kerámia-kerámia kompozitok ára 15 és 100 USD/kg között változik. A folytonos kerámia erősítőfázisokat 1000–10 000 USD/kg áron forgalmazzák. A magas ár fő oka, hogy – az alacsony kereslet miatt – ezeket az anyagokat kis sorozatban készítik. A folytonos erősítőfázisú társított kerámiák jellemző ára 2000–3000 USD/kg. Az oxidalapú termékek valamivel olcsóbbak, mint a nem-oxidalapúak.

Megfelelő volumenű gyártás esetén a folytonos kerámia erősítőfázisok ára 100–1000 USD/kg értékre csökkenhet. A belőlük készülő társított anyagok így várhatóan 400–800 USD/kg-ba fognak kerülni. Ezen az árszinten a kerámia kompozitok már versenyképesek a különlegesen ötvözött acélokkal a teljes életciklusra számított költségek alapján és a hőálló acélokkal mind a teljes életciklus költségei, mind a beszerzési költségek alapján.

## Zárásképpen

A kerámialapú társított anyagok előnyös tulajdonságainak egy része – alkalmazástechnikai szempontból – ma még csupán műszaki lehetőségnek tekinthető. Gyakorlati kihasználásukhoz további széles körű és intenzív, több tudományos diszciplínát együttesen alkalmazó kutató-fejlesztő munkára van szükség. A fontosabb kutatási-fejlesztési feladatok a következők:

- annak felderítése, hogy az előállítás körülményei miként befolyásolják a mátrixok, illetve az erősítőfázisok tulajdonságait,
- a felületi sajátságok célirányos módosítása a mátrix és az erősítőfázis együttes működésének optimalizálása érdekében,
- a társított rendszerek előállításakor végbemenő folyamatok mechanizmusának megismerése,
- a társított kerámiák tulajdonságaihoz legjobban illeszkedő anyagvizsgálati és anyagminősítési módszerek fejlesztése és bevezetése,

- a társított rendszerekben terhelés hatására, szobahőmérsékleten, illetve magas (> 800 °C) hőmérsékleten bekövetkező alakváltozási, törési, korróziós stb. jelenségek eddiginél alaposabb megértése,
- a társított kerámiák előállításával, tervezésével és alkalmazásával kapcsolatos adatbázisok kialakítása és karbantartása,
- az adott anyagcsaládnhoz illesztett, korszerű tervezési és alkalmazástechnikai irányelvek kidolgozása,
- a gyártástechnológia modellezése és erre alapozott számítógépes irányítása,
- módszertani elvek kidolgozása és ezek alkalmazása a társított kerámiák alkalmazásával kapcsolatos költség-haszon és teljes életciklus elemzéséhez.

A legtöbb rövid és középtávú előrejelzés szerint növekszik az igény olyan szerkezeti anyagok iránt, amelyeket az eddigieknél magasabb hőmérsékleteken, jelentős fizikai és kémiai igénybevétel mellett lehet felhasználni. A társított kerámiák éppen ebben a szegmensben juthatnak fontos szerephez. Hosszabb távon az atomi szintről kiinduló, számítógéppel irányított anyagfelépítés és termékgyártás feltételeinek megteremtését prognosztizálják. Ebben az esetben előre megtervezett tulajdonságú, a felhasználói kritériumoknak leginkább megfelelő szerkezeti anyagokat és eszközöket lehet készíteni kerámia kompozitokból. Az ilyenfajta „anyagépítéssel” nemcsak a már létező felhasználói igények fedhetők le, hanem új, eddig ismeretlen felhasználási-alkalmazási területek is elérhetővé válnak.

## Irodalom

- [1] Freitag D. W. – Robertson D. V.: Opportunities for Advanced Ceramics to Meet the Needs of the Industries of the Future. U. S. Department of Energy, Washington, D. C. 1998.
- [2] Chawla K. K.: Ceramic Matrix Composites. Chapman Hall, London, 1993. p. 12.
- [3] <http://composite.about.com/library/weekly/aa0030205.htm>
- [4] Halzbebeck D. A. – Ghattev I. Y. – Streckeit H. H.: Ceram. Eng. Sci. Proc. 12 (1991) 1075.
- [5] Sahu S. – Kavecky S. – Illésova L. – Madějova J. – Bertóti I. – Szépvölgyi J.: J. Eur. Ceram. Soc. 18 (1998) 1037.
- [6] Chen Z. C. – Chawla K. K. – Koopman M.: Mater. Sci. Eng. A 367 (1-2) (2004) 24.
- [7] Han J. K. – Suito F. – Lee B.T.: Materials Letters 58 (16) (2004) 2181.
- [8] Zdaniewshu W.: Materials World 5 (3) (1997) 141.
- [9] Urquhart A. W.: Mater. Sci. Eng. A 144 (1991) 75.
- [10] Niihara K.: J. Ceram. Soc. Jpn. 99 (1991) 974.
- [11] Vollath D. – Szabo D. V. – Hausselt J.: J. Eur. Ceram. Soc. 17 (1997) 1317.
- [12] Bhaduri S. – Bhaduri S. B. – Zhou E.: J. Mater. Res. 13 (1) (1998) 156.
- [13] Somasundaram P. – Chen T.: Proc. Mater. Res. Symp. 501 (1998) 161.
- [14] Kidder J. N.: Chem. Mater. 10 (3) (1998) 777.
- [15] Kata D. – Lis J. – Pampuch R.: Solid State Ionics 101-103 (1997) 65.
- [16] Boden G. – Neumann A. – Breuning T. – Tschernikova E. – Hernel W.: J. Eur. Ceram. Soc. 18 (1998) 1461.
- [17] Hnatko M. – Balog M. – Sajgalik P.: Key Eng. Mater. 264-268 (2004) 2305.