

A MŰSZAKI KERÁMIÁK KOPÁSI VISELKEDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ VIZSGÁLATI TÉNYEZŐK

Babcsánné Kiss Judit

tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet,
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metbab@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A műszaki kerámiák kiváló mechanikai tulajdonságainak köszönhetően széleskörűen alkalmazhatók kopásnak kitett gépipari alkatrészekként. Számos területen nemcsak a fémek helyettesítésére, de azokat felülmúló tulajdonságok biztosítására is alkalmasak. Alkalmazásuk során sokféle környezeti- (hőmérséklet, páratartalom) és terhelési tényező (ciklusszám, terhelőerő) szerepet játszik a kialakuló kopásformák megjelenésében. Jelen cikk a terhelési tényezők hatásának vizsgálatával foglalkozik, ennek kimutatására a mérések fretting-módszerrel történtek szobahőmérsékleten, 50% relatív páratartalmú levegőn 2 és 5 N terhelőerővel, valamint 30.000 és 50.000 ciklusszám mellett. A vizsgálatok során egyértelműen kimutatható volt a terhelőerő és a vizsgálat hosszának hatása a szilícium-nitrid alapú kerámiák kopási viselkedésére.

Kulcsszavak: Si_3N_4 , terhelőerő-függés, ciklusszám-függés, fretting

Abstract

Due to the excellent mechanical properties of technical ceramics, they can be widely used as mechanical components exposed to wear. In many fields, they are suitable not only for replacing metals but also for providing superior properties. During their application, many environmental (temperature, humidity) and loading factors (number of cycles, loading force) play a role in the appearance of the evolving wear formats. The present article deals with the study of the effect of loading factors, for which the measurements were performed by the fretting method at room temperature, in air with 50% relative humidity with a loading force of 2 and 5 N, and with 30.000 and 50.000 cycles. The effect of loading force and test length on the wear of silicon nitride-based ceramics was clearly demonstrated during the tests.

Keywords: Si_3N_4 , loading force-dependence, number of cycling-dependence, fretting

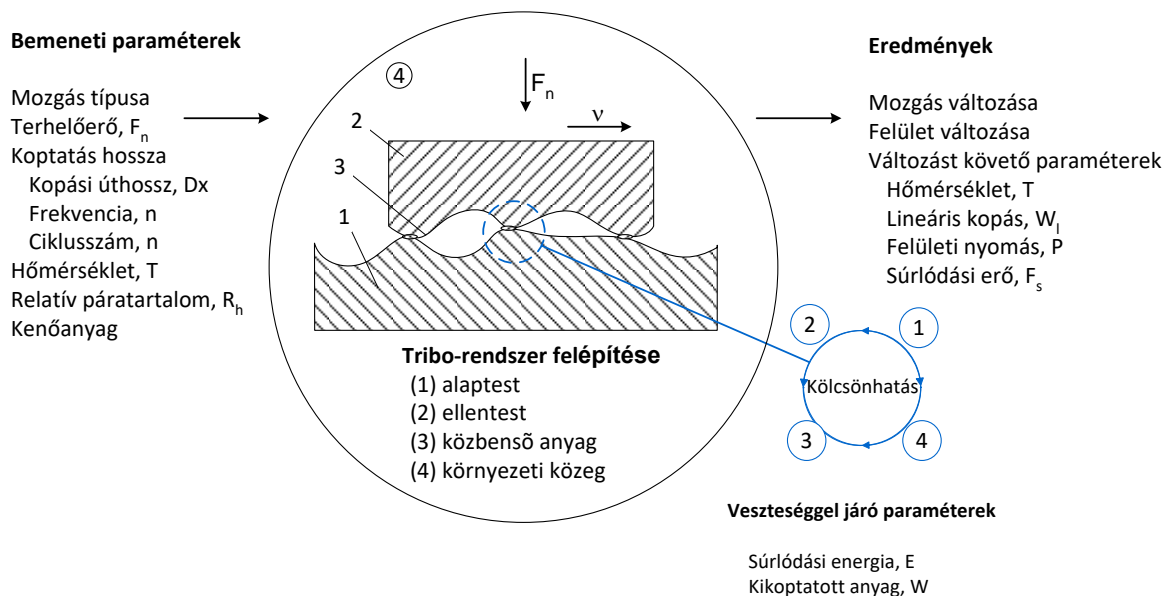
1. Bevezetés

A tribológia az "egymással kölcsönös mozgási viszonyban lévő felületeket kutató tudományág, illetve ennek eredményeit felhasználó technika" [1]. Egy másik megfogalmazásban "a tribológia a kölcsönösen egymásra ható és egymáshoz viszonyítva elmozduló felületek tudománya és technológiája, egyben felöleli az ezzel kapcsolatban álló gyakorlati intézkedéseket" [2].

Egy tribológiai rendszer felépítését a kopási folyamatban résztvevő anyagpárok, továbbá ezek tribológiai szempontból lényeges tulajdonságai és az anyagpárok kölcsönös egymásra hatása jellemzi. A súrlódás és a kopás tehát nem anyagi tulajdonság. Ezek a sajátosságok egy adott tribológiai rendszerre vonatkozóan adnak felvilágosítást, amelyet jellemzően két egymáson elcsúszó test, a kenőanyag és a környezet alkotnak. Az 1. ábra egy tribológiai rendszerről, a súrlódási és kopási értékeket befolyá-

soló általános tényezőkről nyújt áttekintést [2-6]. Az elemi tribológiai rendszert általában négy elem alkotja: az alaptest (1), az ellentest (2), az érintkező testek között található közbenső anyag (3) és az őket körülvevő környezeti közeg.

Ahogy az 1. ábra is mutatja, két, egymáson kölcsönösen elmozduló, azaz súrlódó anyagpár felülete többféle módon reagál a kontaktusra a rá ható erőtől, a mozgás fajtájától és a környezeti közegtől függően. Így tehát, a keletkező törmelék mennyisége és minősége is változik a koptatás során, tovább módosítva a létrejövő kopási mechanizmust, egy egyenletes kopás is átalakulhat abrazív szemcsékkel telített vagy durva leválásokat okozó kopássá. Természetesen ezek az anyagszerkezeti változások csak a súrlódó felületeket érintik, nem hatnak az anyag egészére.



1. ábra. Elemi tribológiai rendszer: a kopást kiváltó igénybevétel és a kopási károsodás elemeinek kapcsolata [4, 6-8].

Gyakorlati tapasztalat, hogy fémes anyagok kopásállósága az anyag keménységével arányosan javul. Kerámiáknál az eddigi tapasztalatok arra utalnak, hogy a keménység és kopásállóság között ilyen egyértelmű párhuzam nem vonható [9]. Bár a kerámiák kopási folyamatát meghatározó mechanizmusokat ma még nem ismerjük olyan részletekbe menően, mint a fémekét, ahol a kopási tulajdonságok befolyásolására, javítására számos eljárást ismerünk. Ezek egy része a felületi réteg szerkezetének, tulajdonságainak módosításával [10-15], más része az anyag teljes térfogatára kiterjedő hőkezelési művelettel [16, 17] biztosítja a kedvezőbb kopási jellemzőket.

2. Vizsgálati eredmények

A vizsgálati paraméterek közül a terhelőerő és a ciklusszám változtatásának hatása került elemzésre a SiAlON-Si₃N₄ anyagpárosítás kopási viselkedésének tükrében. A tribológiai vizsgálatok elvégzése a berlini Anyagtudományi Intézetben (Bundesantalt für Materialforschung) történt. Könnyű belátni,

hogyan abban az esetben, ha a kopási vizsgálatok során az alkalmazott terhelőerő kisebb, vagy a vizsgálati idő rövidebb lesz (a ciklusszám csökkentésével) a kikoptatott anyagterfogat is kisebb lesz. Sokkal érdekesebb megfigyelni a mérések alatt lejátszódó kopási mechanizmusokat, ami sok esetben beszéde-sebb információ az anyagpárosítás tribológiai viselkedéséről. A hatás jobb szemléltetése végett a mérések felületkezelt mintákon is összehasonlításra került, az alkalmazott technológia C^+ és N^+ -ionnal végzett ion-implantáció volt [18, 19]. A vizsgálatok során alkalmazott paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

1 táblázat. A kopásvizsgálat paraméterei.

	Terhelőerő	Ciklusszám
	hatásának vizsgálata	
Golyó	Si_3N_4	Si_3N_4
Vizsgálati minta	SiAlON	SiAlON
Kopásnyom hossza, Δx [mm]	0,2	0,2
Frekvencia, ν [Hz]	20	20
Terhelőerő, F_n [N]	2 és 5	5
Ciklusszám, n [10^3]	50	30 és 50
Hőmérséklet, T [°C]	24	24
Relatív páratartalom, R_h [%]	50	50

A szerszám térfogati kopását a következő összefüggéssel számítjuk ki:

$$W_{v,b} = \frac{\pi \cdot d_{b,\perp}^2 \cdot d_{b,\parallel}^2}{64} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) = \frac{\pi \cdot d_{b,\parallel}^2}{8} \cdot W_{l,b}; \quad (1)$$

a vizsgált próbatest térfogati kopása:

$$W_{v,p} = \frac{\pi \cdot d_{b,\perp}^2 \cdot d_{b,\parallel}^2}{64 \cdot R'} + \Delta x \cdot W_p = \frac{\pi \cdot d_{b,\parallel}^2}{8} \cdot W_{l,p} + \Delta x \cdot W_p; \quad (2)$$

a szerszám és a minta együttes térfogati kopása:

$$W_{v,e} = W_{v,b} + W_{v,p} \quad (3)$$

ahol:

$W_{v,b}$: a szerszám térfogati kopása [mm^3];

$W_{v,p}$: a minta térfogati kopása [mm^3];

$d_{b,\perp}$: a szerszám kopásnyomának átmérője merőlegesen a csúszás irányára [mm];

$d_{b,\parallel}$: a szerszám kopásnyomának átmérője párhuzamosan a csúszás irányára [mm];

R : a szerszám sugara [mm];

R' : a lekoptatott szerszám sugara, a kopásprofilból származtatva [mm].

A kopási sebesség és együttható meghatározásához szükségünk van egyrészt a kopásvizsgálattal egyidőben mérhető adatokra, ilyen pl. a lineáris kopás, másrészt a mérés után a kopásnyom geometriai

jellemzőiből származtatott olyan méretekre, mint a kopásnyom hossza, szélessége és mélysége. A vizsgálatok során a kopási sebesség

$$k_s = \frac{W_{v,e}}{\Delta x \cdot n}; \quad (4)$$

és a kopási együttható az alábbiak szerint értelmezhető:

$$k = \frac{W_{v,e}}{\Delta x \cdot n \cdot F_n}; \quad (5)$$

ahol

k_s : a kopási sebesség, [mm^3/m];

k : a kopási együttható, [mm^3/Nm];

$W_{v,e}$: a teljes, vagy ún. együttes térfogati kopás, [mm^3];

F_n : a normál irányú terhelés, [N];

Δx : a kopásnyom hossza, [mm];

n : a kopatási ciklusok száma.

A számszerű eredményeket a terhelőerő változtatásánál a 2. táblázat, a ciklusszám változtatásánál a 3. táblázat tartalmazza a kopási sebességgel (k_s), illetve kopási együtthatóval (k) az együttes volumetrikus kopással ($W_{v,e}$) és a súrlódási együtthatóval (μ), a változóként szereplő paraméterek melletti jelölések utalnak az implantáció során alkalmazott energiára és ionra.

2.1. Terhelőerő hatása a kopási sebességre

A terhelőerő hatásának vizsgálatokor a tribológiai tulajdonságot a kopási sebességgel (k_s) jellemeztem, ami a kikoptatott térfogatot adja meg a kopási úthossz függvényében, így kihagyjuk a terhelőerő értékét a nevezőből, ami befolyásolná a végeredményt.

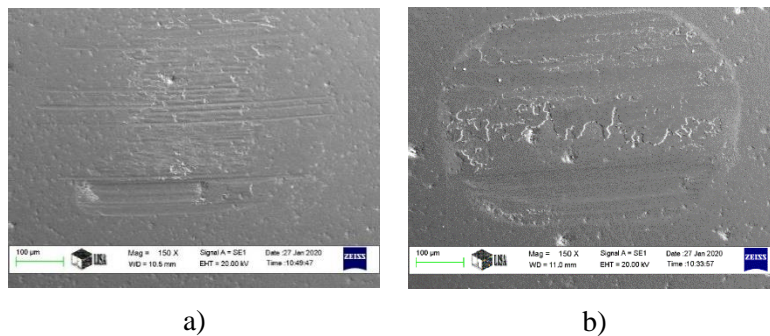
2. táblázat. Terhelőerő változtatásának hatása a kopási jellemzőkre.

F_n	$W_{v,b}$	$W_{v,p}$	W_v	$k_{s,b}$	$k_{s,p}$	k_s	μ
N	10^{-6} mm^3			$10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$			
2	457,89	27,53	485,42	22,89	0,14	24,27	0,41
5	727,91	147,89	875,80	46,66	0,30	43,79	0,65
2 (0,5 MeV N^+)	413,26	13,02	426,28	20,66	0,07	21,31	0,46
5 (0,5 MeV N^+)	549,73	190,27	740,01	32,28	0,43	37,00	0,6

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a jelen paraméterek alapján a terhelőerőnek egyértelműen hatása van a súrlódási együtthatóra, a vizsgálatok során az alkalmazott terhelőerő növelésével a súrlódási együttható is megnövekedett. A kopási tulajdonságokat nézve szintén látjuk, hogy ahogyan az várható, a terhelőerő növelésével a kikoptatott anyagtérfogat is megnő mind a kezeletlen, mind az implantált próba esetén, előbbi esetén 80%-kal, utóbbi esetén 70%-kal, ez igaz volt a kopási sebességre is. Ha külön-külön megvizsgáljuk a SiAlON minta és a Si_3N_4 szerszám kopási viselkedését, láthat-

jük, hogy amíg a szerszám kikoptatott térfogata mintegy 60%-kal, illetve 30%-kal növekszik 5 N terhelőerő alkalmazásával a 2 N terhelőerőhöz képest a kezeletlen és az implantált mintán végzett mérés során, a próbatestek esetén ezek az értékek 5-szörösére, illetve 14-szeresére adódtak. Ez a nagy különbség a nagyobb terhelőerő hatására kialakuló nagyobb nyírási feszültségre utal, a kialakuló nyomás hatására az abrazív mechanizmus jobban érvényesül, mint az adhezív, így a szemcsék által okozott barázdálódás, és ezzel együtt a kikoptatott térfogat is nagyobb lesz.

Az 2. ábra mutatja a különböző terhelőerővel végzett kopási vizsgálat után a mintákon lévő kopásnyomok scanning elektron mikroszkópos felvételeit, aminek elkészítésében a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kara nyújtott segítséget.



2. ábra. Kopásnyom scanning elektron mikroszkópos felvétele a 2 N a), és 5 N b) terhelőerővel végzett mérések után a vizsgált mintákon.

Az a) felvétel a 2 N-nal végzett mérések eredménye, a b) felvétel az 5 N terhelőerővel készített nyom látható. A 2 N terhelőerővel végzett mérések során abrazív kopási mechanizmus lépett fel, ezt jól mutatják a kialakult barázdák a kopásnyomban. A megnövelt terhelőerő (5 N) hatására a tribokémiai hatások is érvényesülnek, ennek megfelelően alakult ki a kopásnyomon tribofilm.

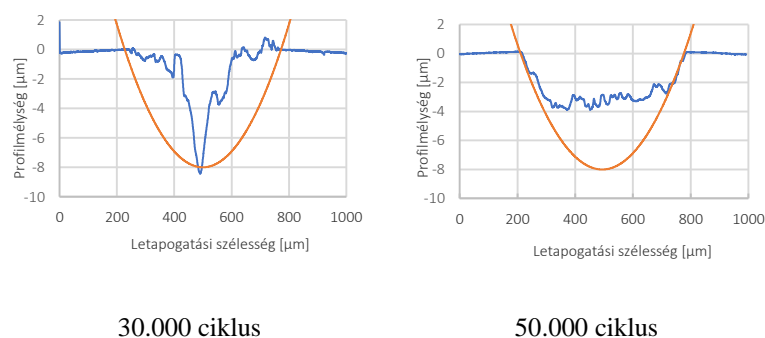
2.2. Ciklusszám hatása a kopási együtthatóra

A ciklusszám hatásának vizsgálatához a mérések az 1. táblázatban látható paraméterekkel történtek, a kopásnyom hossza (Δx) 0,2 mm; a frekvencia (ν) 20 Hz; a terhelőerő (F_n) pedig 5 N volt. A ciklusszám változtatása nem volt hatással a súrlódási együtthatóra, az értékek minden esetben 0,58 és 0,65 közé adódtak (3. táblázat).

3. táblázat. Ciklusszám változtatásának hatása a kopási jellemzőkre.

n	$W_{v,b}$	$W_{v,p}$	$W_{v,e}$	k_b	k_p	k_e	μ
10^3		10^{-6} mm^3		$10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$			-
30 (0,5 MeV C^+)	420,48	158,61	579,10	7,01	2,64	9,65	0,61
50 (0,5 MeV C^+)	709,78	365,27	1075,04	7,10	3,65	10,75	0,58
30 (1 MeV C^+)	403,32	411,00	814,32	6,72	6,85	13,57	0,63
50 (1 MeV C^+)	614,86	426,07	1040,94	6,15	4,26	10,41	0,58
30 (2 MeV C^+)	428,13	486,29	914,42	7,14	8,10	15,24	0,65
50 (2 MeV C^+)	618,68	1032,98	1651,66	6,19	10,33	16,52	0,65

Mint ahogyan a terhelőerő hatásának vizsgálatakor, a különböző ciklusszámmal végzett mérések kiértékelésénél is találkozunk azzal a problémával, miszerint a kopási együttható értékét olyan összefüggéssel határozzuk meg, ami a változtatott paramétert tartalmazza. Ebben az esetben a kikoptatott anyagtérfogat szerint hasonlítottam össze a különböző eredményeket, különös tekintettel a kialakult kopási mechanizmusokra. A 3. ábra a 2 MeV C^+ -ionnal implantált minták kopásnyomainak profilgörbéi láthatók. Az implantált réteg körülbelül 1,5 μm mélységben helyezkedik el a felület alatt, de a felület és a réteg között is módosul az anyag szerkezete, tehát hatással lesz a kopási tulajdonságokra. Látható, hogy a 30.000 ciklussal végzett mérés során a kopás nagyrészt az amorf rétegben játszódott le, az abrazív szemcsék miatt alakult ki egy-egy mélyebb árok.



3. ábra. Különböző ciklusszámmal végzett koptatási vizsgálatok profilgörbéi.

Ha a 3. táblázat számszerű értékeit nézzük, a 0,5 MeV energiával és C^+ -ionnal végzett implantációt követő 30.000 ciklusszámmal végzett vizsgálat eredményénél láthatunk egy kiugróan alacsony értéket, ami a többi esetben nem jellemző, illetve a 2 MeV energiával implantált minta esetén ugyanilyen szélsőértéket kapunk az 50.000 ciklusszámmal végzett mérés során. Az első esetben a kopási mechanizmus az implantált rétegben zajlott le, míg a nagy energiájú implantáció során a mikroszerkezet nagymértékű átalakulása miatt a hosszabb koptatás során jobban érvényesült az abrazív kopási mechanizmus, így nagyobbra adódott a kikoptatott térfogat. A szerszámon jelentkező kopás mértéke mindhárom mintánál ugyanolyan mértékben volt jelen a ciklusszám növekedésével arányos mértékben, az előbb említett esetben (0,5 MeV C^+) csak a mintán jelentkezett a kikoptatott anyag jelentős csökkenése a ciklusszám csökkentésével. Ez alapján megállapítható, hogy a ciklusszám változtatása hatással van a létrejövő kopási mechanizmus kialakulására, ezzel együtt a kopási együtthatóra is.

3. Összefoglalás

A kutatómunka során a tribológiai vizsgálatok két fontos paraméterének hatása került kifejtésre. A terhelőerő és a ciklusszám megválasztása nagy körültekintést igényel a felületkezelt kerámia próbatetek vizsgálata során. Figyelembe kell venni a minták felületi rétegének vastagságát és a kerámia alkalmazási körét. A műszaki kerámiákat általában tartósan kopásnak kitett alkatrészként használjuk, egy-egy tribológiai vizsgálat során nemcsak a felületi réteg kopásállóságát kell vizsgálnunk, de a hosszabb távon kialakuló különböző kopásformák is fontos szerepet játszanak.

Az ion-implantációval módosított Si_3N_4 alapú műszaki kerámiák 2 és 5 N terhelőerő, illetve 30.000 és 50.000 ciklusszám alkalmazásával kerültek összehasonlításra. Az alkalmazott terhelőerő tekinteté-

ben elmondható, hogy mind a kezeletlen, mind a 0,5 MeV energiával és N^+ ionnal implantált próbák esetén a SiAlON próbatestek kopása többszöröse volt 5 N-nal végzett mérés esetén, mint a 2 N-nal végrehajtott vizsgálat során. A Si_3N_4 szerszám kopási térfogatában nem volt ilyen különbség a két terhelőerő összehasonlításában, ezért kijelenthetjük, hogy a felületkezelt mintadarabok érzékenyebbek a kialakuló kopásformák következtében lejátszódó tribológiai folyamatokra.

A különböző ciklusszámmal végzett $Si_3N_4 - Si_3N_4$ alapú kerámia anyagpárral végzett tribológiai vizsgálatok rámutatnak arra, hogy a kezeletlen, kereskedelmi forgalomban is kapható tiszta Si_3N_4 szerszámmal végzett koptatás hossza nincs hatással a szerszámon jelentkező kikoptatott térfogatra, azzal arányosan növekszik. Eltérő kopási mechanizmus csak a felületkezelt Si_3N_4 alapú kerámia próbatesten jelentkezett, ahol a kezelt felületi réteg vastagságától függően változott a próbatest kikoptatott térfogata a koptatás időtartamának változtatásával.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

- [1] Bakos F.: Idegen szavak és kifejezések szótára, Akadémiai kiadó, 1984.
- [2] Valasek I.: Tribológiai kézikönyv, Tribotechnik Kft, 1996.
- [3] Czichos, H., Habig, K-H.: Tribologie Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tri-botechnik, Vieweg+Teubner Verlag, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9660-5>
- [4] Lenke, I.: Tribologie, Reibung und Verschleiß, CeramTec AG Forschung und Entwicklung, Plochingen, 2009.
- [5] Czichos, H.: Tribology: a systems approach to the science and technology of friction lubrication and wear, Elsevier, 1978. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(78\)90209-8](https://doi.org/10.1016/0301-679X(78)90209-8)
- [6] <https://www.ggbearings.com/en/company/tribology>
- [7] Mang, T., Bobzin, K., Bartels, T.: Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication, Wiley-VCH, 2011. <https://doi.org/10.1002/9783527632572>
- [8] Dreyer, M. R., Gergye, T.: Kopási folyamatok online mérése, Magyar Tudomány, Külön-szám, Mobilitás és környezet, 2012.
- [9] MB Maros, AK Németh, Wear maps of HIP sintered Si_3N_4/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions, Journal of the European Ceramic Society 2017, 37(14):4357-4369. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.005>
- [10] Brenscheidt, F., Matz, W., Wieser, E., Möller, W.: Annealing studies of chromium-implanted silicon nitride ceramics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 1997, B127/128:677-680. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(96\)01154-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(96)01154-8)
- [11] Nakamura, N., Hirao, K., Yamauchi, Y.: Tribological properties of silicon nitride ceramics modified by ion implantation, Journal of European Ceramic Society 2004, 24(2):219. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00243-7](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00243-7)
- [12] Nakamura, N., Hirao, K., Yamauchi, Y.: Investigation of wear surfaces in Si⁺-implanted unidirectionally aligned silicon nitride using TEM and XPS, Surface & Coatings Technology 2004, 186:339-345. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.12.005>

- [13] Nakamura, N., Hirao, K., Yamauchi, Y.: Surface analytical studies of ion-implanted unidirectionally aligned silicon nitride for tribological applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 2004, B217:51-59. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2003.09.024>
- [14] Arató P., Balázsi Cs., Kövér Zs., Wéber F., Richter E., Gyulai J., Effect of Carbon and Nitrogen Implantation on the Properties of Silicon Nitrides, Key Engineering Materials 2005, 290:160-166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.290.160>
- [15] Balázsi Cs., Wéber f., Arató P., Surface modification of silicon nitride ceramics, Materials Science Forum 2005, 473-474:33-38, 2005. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.33>
- [16] Marosné, B.M., Babcsán, K.J., Kuzsella, L., Arató, P. Some Experiences of Tribological Microstructural and Mechanical Investigation of Post Heat Treated SiAlON Ceramics, Materials Science Forum 2005, 473-474:135-140. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.135>
- [17] Babcsán, J., Maros, M.B., Arató, P. Microstructural Features of the Post Heat-Treated Si₃N₄ Based Ceramics, Silicates Industriels 2004, 69(7-8):199-203.
- [18] Babcsánné Kiss, Judit, Ion-implantációval módosított Si₃N₄ kerámia tribológiai tulajdonságai, GÉP 2009, 60(6):41-48.
- [19] Babcsán, J.K. ; M B, Maros ; N, Wanderka ; J, Klaffke ; H, Schubert, Effect of Ion-implantation on the Microstructure of Si₃N₄ Based Ceramics, Key Engineering Materials 2005, 290:234-237. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.290.234>