

TRIBOLOJİK UYGULAMALARA YÖNELİK SiAlON SERAMİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Nurcan Çalış AÇIKBAŞ^{1,2}, Ferhat KARA², Hasan MANDAL², Ravi KUMAR³, Bikramjit BASU³

¹MDA İleri Teknoloji Seramikleri San. Tic. Ltd. Şti., Eskişehir/Türkiye

²Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir/Türkiye

³Kanpur-Hindistan Teknoloji Enstitüsü, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü, Kanpur/Hindistan

ÖZET

Bu çalışmada, farklı $\alpha:\beta$ faz oranına, kırılma tokluğuna ve sertliğe sahip gaz basınçlı sinterlenme (GPS) ve basınçsız sinterleme (PLS) ile üretilmiş SiAlON seramiklerinin tribolojik davranışı incelenmiştir. SiAlON seramiklerinin tribolojik özellikleri ticari SiAlON bilye kullanılarak yağlayıcı kullanmaksızın test edilmiştir. Triboloji testleri sonrasında sürtünme katsayısının dar bir aralıkta (0.59-0.64) değiştiği ve aşınma oranının 10^{-5} - 10^{-6} mm³/N.m arasında olduğu görülmüştür. Mevcut test koşulları için malzemelerin kırılma tokluğu, sertlik ve mikroyapı tribolojik davranış ilişkisi açıklanmıştır. SiAlON seramiklerinin aşınma davranışı üzerine mikroyapının en fazla etkisi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak gaz basınçlı sinterleme tekniğine göre daha ekonomik üretim tekniği olan basınçsız sinterleme ile üretilmiş SiAlON seramiklerinin aşınma uygulamalarında potansiyel olabilecekleri ve böylece SiAlON seramiklerinin kullanım alanlarının artacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: SiAlON, Triboloji, Mikroyapı, Mekanik Özellik.

1. GİRİŞ

Sürtünme, yağlama ve aşınma konularını inceleyen bilim ve teknoloji dalına “triboloji” denilmektedir. Triboloji; rulmanlar, mekanik contalar, tıbbi protezler, kesici uçlar, motor parçaları ve nano teknoloji uygulama alanlarında oldukça önemli rol oynamaktadır [1-2]. Tribolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan mevcut ticari seramik malzemeler; Al₂O₃, SiC, ZrO₂, Si₃N₄, B₄C ve BN şeklinde sıralanmaktadır. Yorulma dayanımı, yoğunluk, mukavemet, kırılma tokluğu, sertlik, aşınma direnci, kimyasal dayanım, ısı iletkenlik, ısı genleşme ve termal şok dayanımı tribolojik uygulamalarda malzeme performansını etkileyen temel parametrelerdir. Bu özellikler karşılaştırıldığında Si₃N₄ esaslı malzemelerin tribolojik uygulamalarda kullanılmak üzere en uygun malzeme olmasına rağmen, Al₂O₃ esaslı malzemeler daha ekonomik ve yüksek aşınma ve korozyon direncine sahip oldukları için en yaygın kullanılan seramik malzemedir [1-2]

Literatürde Si₃N₄ seramiklerinin tribolojik davranışı üzerine çok sayıda deneysel ve modelleme çalışmaları yapılmış, aşınma geçiş diyagramları ve aşınma haritaları oluşturulmuştur [3-4]. Bu çalışmalarda genellikle malzeme özelliklerinden (kırılma tokluğu, sertlik, ısı iletkenlik v.b.) ziyade test parametrelerinin (yük, kayma hızı, süre, yağlayıcı v.b.) tribolojik davranış üzerine etkisi incelenmiştir. SiAlON seramiklerinin tribolojik davranışının malzeme özellikleri açısından incelendiği sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [5-7]. Bu çalışmalarda genellikle $\alpha:\beta$ -SiAlON faz oranının tribolojik davranış üzerine rolü vurgulanmıştır. Bu nedenle, SiAlON seramiklerinin tribolojik özellik-mekanik özellik (kırılma tokluğu ve sertlik) ve mikroyapı ilişkisinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Gerçekleştirilen çalışma ile literatürde SiAlON seramiklerinin tribolojik özellik-mekanik özellik ve mikroyapı ilişkisinin irdelenmesi konularındaki eksikliklerin giderilmesi ve ekonomik Si₃N₄ tozları ile kristal kimyasının ve yeni üretim süreç parametrelerinin geliştirilmesiyle Al₂O₃ seramikleri ile maliyet

açısından rekabet edebilecek ve benzer ya da daha iyi tribolojik performans gösteren SiAlON seramiklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

α ve β -SiAlON fazları termodinamik olarak dengede olduklarından, α -SiAlON fazının yüksek sertliğinden (~20 GPa) ve β -SiAlON fazının yüksek kırılma tokluğundan (7-8 MPa) faydalanmak için 30 α :70 β SiAlON kompozisyonu tasarlanmıştır. İğnemsiz tane gelişimi ve refrakter tane sınır fazı eldesi için Y-Sm-Ca katyon sistemi ile çalışılmıştır. Malzemelerin kolay sinterlenebilmesi için yüksek sıvı faz içeren kompozisyon tasarlanmış ve sıvı fazın olumsuz etkisini engellemek için nihai malzemede refrakterliği tarafımızdan daha önce kanıtlanmış melilit fazı ($\text{Ln}_2\text{Si}_{3-x}\text{Al}_x\text{O}_{3+x}\text{N}_{4-x}$) kristalizasyonu amaçlanmıştır. Çalışmada üç farklı başlangıç Si_3N_4 tozu kullanılmıştır (Çizelge 1). Dimide sentezi ile üretilen, saflığı yüksek ve Si_3N_4 esaslı seramiklerin üretiminde yaygın olarak kullanılan E10 α - Si_3N_4 tozu çalışmada referans olarak alınmış ve R harfiyle kodlanmıştır. E10 α - Si_3N_4 tozuna göre daha ekonomik ve nitridasyon yöntemiyle üretilmiş Silzot α - Si_3N_4 tozu, yüksek α - Si_3N_4 içeriği nedeniyle A harfiyle kodlanmıştır. Yanma sentezi ile üretilen ve diğer tozlara göre oldukça ekonomik olan β - Si_3N_4 tozu ise B harfi ile kodlama yapılmıştır. Kaba Si_3N_4 tozlarının tane boyutlarını azaltmak için Si_3N_4 bilyelerle, sulu ortamda, atritör değirmende öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme sonrasında β - Si_3N_4 tozu tane boyutu 1 μm (B1) ve 0.5 μm (B0.5)'ye ve Silzot Si_3N_4 tozu tane boyutu 1 μm (A1)'ye azaltılmıştır. Si_3N_4 tozlarının tane boyut ölçümleri lazer difraksiyon cihazıyla yapılmıştır. Hazırlanan kompozisyonlar tek eksenli presle 25 MPa basınç altında ön şekillendirme işlemine tabi tutulduktan sonra yaş yoğunluğu arttırmak için 300 MPa basınç altında soğuk izostatik pres ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numuneler üzerine BN katı yağlayıcı spreylenecek BN pota içerisinde 22 bar azot gaz basıncı altında ve 1 atmosfer basıncında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında 22 bar azot gaz basıncı altında 1990°C'de 5 saat süre ile ısıl işlem uygulanmıştır. α : β SiAlON faz oranı ve tane sınır fazı türü ve kompozisyonları x-ışınları difraktometresi (XRD) yardımıyla tespit edilmiştir. Melilit fazı miktarı düzlemler arası mesafesi (d) 2.81 olan melilit piki şiddetinin, d değeri 2.67 olan β -SiAlON pik şiddetine oranı referans alınarak hesaplanmıştır. Sinterlenmiş ve ısıl işlem görmüş numuneler parlatılmış, Au-Pd karışımı ile kaplanarak taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Sertlik ve kırılma tokluğu ölçümleri Vikers indentasyon tekniği ile 10 kg yük, 10 sn süre ile uygulanarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Başlangıç Si_3N_4 tozlarının özellikleri

Toz	Kod	α : β Faz Oranı	D50 (μm)	Üretim Metodu
E-10	R	98 α :2 β	0.55	Diimide
Silzot HQ	A	89 α :11 β	1.70	Direkt Nitridleme
β - Si_3N_4	B	100 β	4.70	Yanma Sentezi

Triboloji testleri Kanpur Hindistan Teknoloji Enstitüsü (IIT), Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde bilgisayar kontrollü düşük salınımlar altında lineer karşılıklı hareket etme özelliğine sahip triboloji cihazı kullanılarak kuru ortamda, oda sıcaklığında yapılmıştır. Triboloji testi esnasındaki temasların şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Test öncesinde numunelerin yüzeyi parlatılmış ve hem bilye hem de disk aseton içerisinde ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Malzemeler arasında karşılaştırma yapmak amacıyla test koşulları (vuruş mesafesi: 100 μm , salınım frekansı 6 Hz, çevrim sayısı: 45,000, normal yük: 8N) sabit tutulmuştur. Güvenilir sonuçlar elde etmek için her numuneden en az üç kez ölçüm alınmıştır. Bilye olarak çapı 10 mm, z:0.3, E:310 GPa, HV10:15.5 GPa, K1c: 4.7 MPa $\text{m}^{1/2}$ ticari β -SiAlON (TCQ kalite, Toshiba, Japan) numunesi kullanılmıştır. Testler sonrasında malzemelerin aşınma hacimleri lazer yüzey profilometresi (LSP) yardımıyla ve spesifik aşınma oranı Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W = \frac{\Delta V}{D \times L}$$

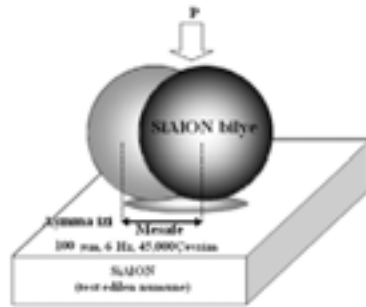
(Eşitlik 1)

ΔV aşınma hacmi (mm^3), D toplam aşınmış mesafe (m) ve L uygulanan yükür (N). Triboloji testi için seçilen malzemeler ve özellikleri Çizelge 2’de verilmektedir. Malzemelerin kodlaması başlangıç Si_3N_4 tozu, sinterleme tekniği ve sinterleme sıcaklığına göre yapılmıştır. Örneğin R; malzemenin referans olarak alınan E10 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ tozuyla üretildiğini, A1; ortalama tane boyutu 1 μm olan $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ tozuyla hazırlandığını, B1; ortalama tane boyutu 1 μm olan $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ tozuyla hazırlandığını ifade etmektedir. P, malzemenin basınçsız sinterleme ile G ise gaz basınçlı sinterleme ile üretildiğini ve HT ise sinterleme sonrasında ısıtma işlemi uygulandığını göstermektedir.

Çizelge 2. Triboloji testi uygulanan SiAlON seramiklerinin özellikleri

Malzeme	Si_3N_4 tozu	Sinterleme Koşulları	%T. Y.	HV10	Kır	XRD (Çarlanış yüzey)
R-1940	E-10 (d50: 0.5 μm)	1940°C, 2 saat, 22 bar N_2	99.93	16.07 ±0.06	5.61 ±0.21	670.33n M 0.89
A1	Silrot (d50: 1 μm)	1940°C, 2 saat, 22 bar N_2	99.70	15.76 ±0.15	5.27 ±0.13	760.24n M 0.71
B1	Beta (d50: 1 μm)	1940°C, 2 saat, 22 bar N_2	99.90	14.22 ±0.13	3.76 ±0.15	920.8n M 0.24
A1:B1	%50A1+%50B1	1940°C, 2 saat, 22 bar N_2	99.96	14.69 ±0.16	4.15 ±0.17	840.16n M 0.20
G-B05	Beta (d50: 0.5 μm)	1850°C, 1 saat, 22 bar N_2	98.90	13.22 ±0.08	4.98 ±0.40	100p Amorf
HT G:B05+%5B3	Beta (d50: 0.5 μm) Çizelge 2: B3 (d50: 3 μm)	1800°C, 1 saat, 22 bar N_2 HT: 1990°C, 5 saat, 22 bar N_2	99.11	12.41 ±0.18	5.45 ±0.17	100p Amorf
P-B05	Beta (d50: 0.5 μm)	1850°C, 1 saat, 1 bar N_2	99.13	12.70 ±0.20	3.01 ±0.20	100p Amorf
R-1850	E-10 (d50: 0.5 μm)	1850°C, 1 saat, 22 bar N_2	98.80	17.59 ±0.19	6.24 ±0.23	710.29n M 0.65

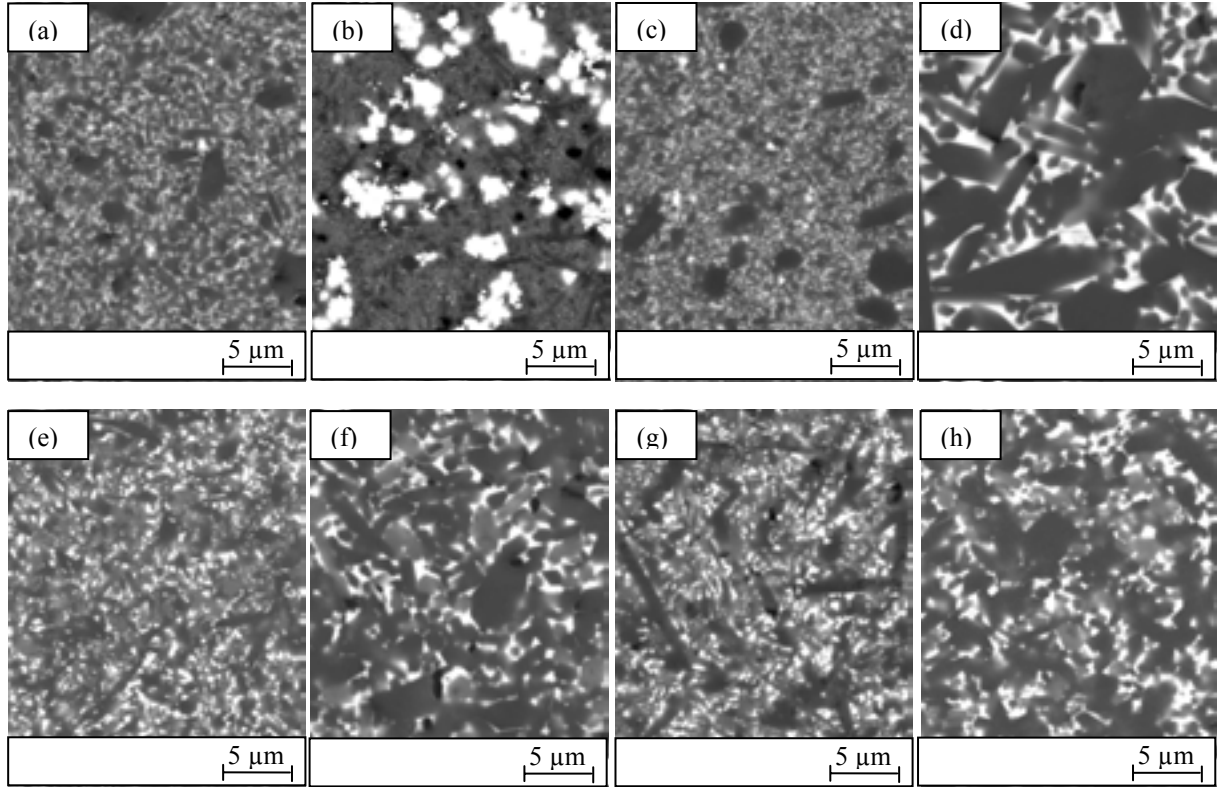
3.



Şekil 1. Triboloji testi esnasındaki temasların şematik gösterimi

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen SiAlON seramiklerinin mikroyapıları Şekil 2’de verilmektedir. $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ’ce zengin toz ile başlanıldığında aspekt oranı yüksek iğnemi şekilli $\beta\text{-SiAlON}$ tanelerinin gelişimi gözlenmiştir (Şekil 2 b, e, g). Başlangıçta tasarlanan 30 α :70 β -SiAlON faz oranı ve tane sınır fazı kristalizasyonunun sağlandığı XRD analizleri sonrasında tespit edilmiştir. İğnemi $\beta\text{-SiAlON}$ taneleri aşınma uygulamaları için oldukça yeterli kırılma tokluğu ($\sim 5.5 \text{ MPam}^{1/2}$) sağlamaktadır.



Şekil 2. SiAlON seramiklerinin SEM-BE görüntüsü (a) G-B0.5, (b) R-1850, (c) P-B0.5, (d) HT-B0.5+%5B3, (e) A1, (f) B1, (g) R-1940, (h) A1:B1

Literatürde başlangıç Si_3N_4 tozunun $\alpha:\beta$ faz oranının mikroyapı gelişimi ve kırılma tokluğu üzerine etkisini tartışan makaleler olmasına rağmen sonuçlar birbiri ile çelişkilidir [8-9]. $\alpha:\beta$ Si_3N_4 faz oranının etkisini gözlemlemek için benzer tane boyutundaki üç farklı toz (A1, 50A150B1 ve B1) aynı sinterleme koşullarında gaz basınçlı fırında sinterlenmiştir. B1 tozundan hazırlanan kompozisyonun sinterlenmesi sonrasında aspekt oranı yüksek olmayan α ve β -SiAlON tanelerinin gelişimi gözlenmiştir (Şekil 2f). Bu nedenle düşük kırılma tokluğu ($\sim 3.76 \text{ MPam}^{1/2}$) elde edilmiştir. B1 tozuna ağırlık %50 A1 tozu karıştırılarak hazırlanan kompozisyonun sinterlenmesi sonrasında, B1 tozundan hazırlanan malzeme ile benzer mikroyapı gelişimi (Şekil 2h) gözlenmiş ancak kırılma tokluğunda bir miktar artış elde edilmiştir ($4.15 \text{ MPam}^{1/2}$). Bu durumun tane sınır fazı kimyasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak A1:B1 toz karışımında mikroyapı gelişimi β - Si_3N_4 tozu tarafından kontrol edildiği görülmüştür. SiAlON seramiklerinin anormal tane büyümesi başlangıç tane boyutu ve tane boyut dağılımı tarafından kontrol edilmekle birlikte sinterleme sonrası uygulanan ısı işlem tane büyümesini sağlamaktadır. Bimodal mikroyapı dağılımı ve yüksek kırılma tokluğu elde etmek için ince ($0.5 \mu\text{m}$) B0.5 tozunun içerisine ağırlık %5, ortalama tane boyutu $3 \mu\text{m}$ olan B3 kodlu β - Si_3N_4 tozu ilave edilmiş ve sinterleme sonrasında ısı işlem uygulanmıştır. Isıl işlem sonrasında anormal tane büyümesi ve yüksek kırılma tokluğu ($5.5 \text{ MPam}^{1/2}$) elde edilmiştir (Şekil 2d).

Üretim süreci SiAlON seramiklerinin yaygın kullanımını sınırlayan bir parametredir. Bu amaçla B0.5 kompozisyonun basınçsız sinterlenmesi 1850°C 'de 1 saat süre ile yapılmış ve nihai ürünün özellikleri gaz basınçlı sinterlenmiş aynı kompozisyondaki malzeme ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2a, c). Her iki sinterleme tekniği sonrasında da benzer mikroyapı gelişimi, 100β -SiAlON fazı ve amorf tane sınır fazı gözlenirken, kırılma tokluğu değerleri ve çatlak ilerleme profilleri şaşırtıcı derecede farklılık göstermiştir. Gaz basınçlı sinterlenmiş malzemede $\sim 5 \text{ MPam}^{1/2}$ tokluk elde edilirken, basınçsız sinterlenmiş numunede $\sim 3 \text{ MPam}^{1/2}$ 'dir. Bu durum muhtemelen tane sınır fazındaki azot çözünürlük miktarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Azot çözünürlüğü gaz basınçlı sinterlenmiş numunede

basınçsız sinterlenmiş numuneye göre daha fazla olmaktadır. Toklaştırma mekanizmaları ara yüzey bağ mukavemeti ile ilişkili olduğundan azotça zengin tane sınır fazı zayıf ara yüzeye ve dolayısıyla yüksek kırılma tokluğuna sebep olmaktadır.

Triboloji testleri sürtünme katsayısının (μ) dar bir aralıkta 0.59-0.64 değiştiği görülmüştür (Çizelge 3). Sonuçlar literatürde benzer koşullarda teste tabi tutulan malzemelerin μ değerleri ile benzerdir (0.63-0.73) [7]. Sürtünme katsayısının malzeme özelliğinden daha çok test koşullarına bağlı olduğunu söylemek mümkündür. SiAlON malzemelerin aşınma hacmi lazer yüzey profilometresi (LSP) yardımıyla hesaplanmıştır (Çizelge 3). Malzeme özelliklerinin (kırılma tokluğu, sertlik, α : β -SiAlON faz miktarı) aşınma dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde sırasıyla G-B0.5, R-1850 ve P-B0.5 kodlu malzemelerin en iyi aşınma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu malzemelerin ortak özellikleri oldukça ince mikroyapı gelişimine sahip olmalarıdır. İnce tanelere sahip olan malzemelerde aşınma esnasında daha az malzeme uzaklaşmasıyla daha az aşınma hacmi elde edilmektedir. Literatürde Si_3N_4 ve diğer seramik malzemelerin aşınma verileri incelendiğinde de benzer durum gözlenmiştir [3,10]. HT-G-B0.5+%5B3 malzemesi kaba mikroyapı gelişimi göstermesine rağmen, oldukça iyi aşınma dayanımına sahiptir. Bu sonuç malzemelerin ısı iletkenliğinin 100β -SiAlON fazı içermesi nedeniyle yüksek olmasından kaynaklanabilir. P-B0.5 ve HT-G-B0.5+%5B3 malzemelerinin mikroyapı ve tokluk değerleri birbirlerinden oldukça farklı olmasına rağmen aşınma dayanımları birbirine benzerdir. Her iki malzeme de 100β -SiAlON fazında ve amorf tane sınır fazına sahiptir. B1 numunesi A1 numunesine göre daha kaba mikroyapı gelişimine sahip olmasına rağmen yüksek β -SiAlON faz içeriği (92β) nedeniyle aşınma davranışı A1 malzemesine benzerdir. Bu sonuç tane boyutundan sonra β -SiAlON faz içeriğinin aşınma dayanımına etkisi olabileceğini göstermektedir. R-1940 malzemesi oldukça kaba ve bimodal mikroyapı gelişimi sergilemekte ve 67β : 33α -SiAlON faz içeriğinde olup düşük aşınma dayanımına sahiptir. En kötü aşınma dayanımını kaba mikroyapı gelişimi ve düşük kırılma tokluğu ($4.15 \text{ MPam}^{1/2}$) ile A1:B1 numunesi sahiptir. Sonuç olarak SiAlON seramiklerinin tribolojik davranışında tane boyutunun en önemli etkisi olduğu ve β -SiAlON faz içeriğinin de tribolojik davranışı etkilediği görülmüştür.

Çizelge 3. Geliştirilen SiAlON seramiklerinin μ , aşınma hacmi, aşınma oranı karşılaştırılması

Numune	μ	Aşınma Hacmi (mm^3)	Aşınma Oranı (mm^3/Nm)	HV10 (GPa)	K _{IC} ($\text{MPam}^{1/2}$)	XRD	Mikroyapı
G-B0.5	0.60	2.06E-04	2.86E-06	13.22 ± 0.08	4.98 ± 0.40	100 β Amorf	Çok ince
R-1850	0.62	3.96E-04	5.50E-06	17.59 ± 0.19	6.24 ± 0.23	71 β :29 α M.65	Çok ince
P-B0.5	0.61	5.27E-04	7.32E-06	12.70 ± 0.20	3.01 ± 0.20	100 β Amorf	Çok ince
HTG-B0.5+%5B3	0.63	9.80E-04	1.36E-05	12.41 ± 0.18	5.45 ± 0.17	100 β Amorf	Kaba-bimodal
A1	0.62	2.19E-03	3.04E-05	15.76 ± 0.15	5.27 ± 0.13	76 β :24 α M.0.71	İnce-bimodal
B1	0.64	3.04E-03	4.22E-05	14.22 ± 0.13	3.76 ± 0.15	92 β :8 α M.0.24	Kaba
R-1940	0.63	3.98E-03	5.53E-05	16.07 ± 0.06	5.61 ± 0.21	67 β :33 α M.0.89	Kaba-bimodal
A1:B1	0.59	6.03E-03	8.40E-05	14.69 ± 0.16	4.15 ± 0.17	84 β :16 α M.0.20	Kaba

Kırılma tokluğu aşınma oranı/aşınma hacmi ilişkisi incelendiğinde P-B0.5 ve G-B0.5 numuneleri farklı kırılma tokluğu (3.01 ve 4.98) değerlerine sahip olmalarına rağmen, benzer mikroyapılara ve β -SiAlON faz miktarına sahip oldukları için aşınma oranları $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ seviyelerinde olup benzerdir. Bu sonuç kırılma tokluğunun mevcut test koşulları altında önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Sertlik aşınma oranı/aşınma hacmi ilişkisi incelendiğinde, R-1940 malzemesinin sertliğinin diğer SiAlON malzemeleri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek (16.07 GPa) olmasına karşın, düşük sertliği olan ve R-1940 gibi bimodal mikroyapı gelişimi gösteren HT-G-B0.5+%5B3 malzemesine

göre daha düşük aşınma dayanımı sergilemiştir. Bunun nedeni R-1940 malzemesinin β -SiAlON fazının daha az olmasından kaynaklanabilir. Mevcut numunelerde benzer mikroyapı gelişimi ve α : β oranı ancak farklı tane sınır fazı kimyasında olan SiAlON seramikleri üretilmediğinden tane sınır fazı kimyasının tribolojik davranış üzerine etkisini tartışmak mümkün olmamıştır.

4. GENEL SONUÇLAR

Triboloji testleri sonrasında, mikroyapının aşınma dayanımını kontrol eden en önemli parametre ve β -SiAlON faz içeriğinin ikinci kritik parametre olduğu görülmüştür. Ekonomik Si_3N_4 tozları kullanılarak, üretim parametrelerinin kontrolü ile referans toz kullanılarak hazırlanan malzemelere benzer özellikte malzeme gelişimi sağlanmış ve bu malzemelerin tribolojik uygulamalarda potansiyel olacağı düşünülmektedir. Özellikle basınçsız sinterleme ile aşınma dayanımı yüksek ve alümina seramikleri ile hem maliyet hem de aşınma dayanımı açısından rekabet edebilecek özellikte SiAlON seramiklerinin geliştirilmesiyle, SiAlON seramiklerinin kullanım alanları artacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Hutchings, I. M., *Tribology: friction and wear of engineering material*, p.1-3, 1992.
2. Jahanmir, S., *Friction and wear of ceramics*, p.3-12, Marcel Decker, Inc, 1994.
3. Yushu, W., *A study on the wear and wear transitions of ceramics*, PhD. Thesis, University of Maryland College Park, 1994.
4. Gomes, J.R., Miranda, A.S., Vieira, J.M., Silva, R.F., *Sliding speed-temperature wear transition maps for Si_3N_4 /iron alloy couples*, *Wear*, Vol:8786, p.1-6, 2001.
5. Jones, M., Hirao, K., Hyuga, H., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., *Wear properties of γ α : β SiAlON ceramics*, *J. Euro. Ceram. Soc.*, Vol:23, p.1743-1750, 2003.
6. Reis, P., Dovim, J.P., Xu, X., Ferreira, J.M.F., *Tribological behavior of colloiddally processed SiAlON ceramics sliding against steel under dry conditions*, *Tribology Letters*, Vol:118, p.295-301, 2005.
7. Compbell, P., Laoui, T., Celis, J.P., Van Der Biest, O., *The influence of intergranular phases on tribological performance of SiAlONs*, *Mat. Sci. Eng.*, A207, 72-86, 1996.
8. Lange, F. F., *Fracture toughness of Si_3N_4 as a function of the initial α -phase content*, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol:62 [7-8], p. 428, 1979.
9. Mitomo, M., Uenosono, S., *Microstructural development during gas pressure sintering of α - Si_3N_4* , *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol:75, p. 103, 1992.
10. Dogan, C.P., Hawk, J.A., *Microstructure and abrasive wear in silicon nitride ceramics*, *Wear*, Vol: 250, p. 256-263, 2001.