



Tane Sınır Faz Miktarı Değişiminin Nadir Toprak Oksit (Y_2O_3) Katkılı Si_3N_4 İleri Teknoloji Seramiklerinde Termal İletkenliğe Etkisi

The Effect of Grain Boundary Phase Amount Change on Thermal Conductivity in Rare Earth Oxide (Y_2O_3) Dopped Si_3N_4 Advanced Technology Ceramics

Pınar UYAN¹, Servet TURAN²

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Metalurji Programı, Bilecik

• pinar.uyan@bilecik.edu.tr • ORCID > 0000-0003-0411-9773

²Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

• sturan@eskisehir.edu.tr • ORCID > 0000-0002-7322-3091

Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types: Araştırma Makalesi / Research Article

Geliş Tarihi / Received: 21 Temmuz / July 2022

Kabul Tarihi / Accepted: 17 Ağustos/ August 2022

Yıl / Year: 2022 | **Cilt – Volume:** 2 | **Sayı – Issue:** 2 | **Sayfa / Pages:** 109-118

Atıf/Cite as: Uyan, P. ve Turan, S. "Tane Sınır Faz Miktarı Değişiminin Nadir Toprak Oksit (Y_2O_3) Katkılı Si_3N_4 İleri Teknoloji Seramiklerinde Termal İletkenliğe Etkisi" Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 2(2), Eylül 2022: 109-118.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Dr. Öğr. Üyesi Pınar UYAN

TANE SINIR FAZ MİKTARI DEĞİŞİMİNİN NADİR TOPRAK OKSİT (Y_2O_3) KATKILI Si_3N_4 İLERİ TEKNOLOJİ SERAMİKLERİNDE TERMAL İLETKENLİĞE ETKİSİ

ÖZ:

Bu çalışmada, sabit faz oranında, tane sınır faz miktarı %10 azaltılarak, 1775 °C'de, 5 bar basınçta 4 saat sinterlenmiş ve daha düşük maliyetli başlangıç Si_3N_4 tozu (Silzot) kullanılarak hazırlanmış $Y_2O_3/SiO_2/MgO-Si_3N_4$ seramik sisteminde, tane sınır faz miktarının ve dağılımının termal iletkenliğe etkisi incelenmiştir. XRD metoduyla faz analizi, SEM ile görüntü analizleri yapılmıştır. Lazer Flash Metoduyla termal difüzyon hızları ölçülmüştür. XRD paternlerinde $Y_2Si_3O_3N_4$ ikincil kristalin fazı görülmüştür. Tane sınır fazının azatılmasıyla, sıvı faz miktarı % 11,83'den % 10,6'a, ~% 10,40 azalmıştır. Termal difüzyon hızı 17,29 mm²/sn'den 15,97 mm²/sn'e ~7,64 azalmıştır. Termal iletkenlik, 39,10 W/m.K'den 36,23 W/m.K'e, ~% 7,37 azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termal Difüzyon Hızı, Termal İletkenlik, Si_3N_4 , Tane Sınır Fazı.



THE EFFECT OF GRAIN BOUNDARY PHASE AMOUNT CHANGE ON THERMAL CONDUCTIVITY IN RARE EARTH OXIDE (Y_2O_3) DOPPED Si_3N_4 ADVANCED TECHNOLOGY CERAMICS

ABSTRACT

In this study, in the fixed phase ratio, the grain boundary phase amount was reduced by 10%, the grain boundary phase amount was determined in the $Y_2O_3/SiO_2/MgO-Si_3N_4$ ceramic system, which was sintered at 1775 ° C for 4 hours at 5 bar pressure and prepared by using lower cost starting Si_3N_4 powder (Silzot). The effect of and distribution on thermal conductivity has been studied. Phase analysis with XRD and image analysis with SEM were performed. Thermal diffusivities were measured with the Laser Flash Method. $Y_2Si_3O_3N_4$ secondary crystalline phase was observed in XRD patterns. With the reduction of the grain boundary phase, the amount of liquid phase decreased from 11.83% to 10.6%, ~ 10.40%. Thermal diffusivity has decreased from 17.29 mm²/s to 15.97 mm²/s by ~ 7.64. Thermal conductivity decreased ~ 7.37% from 39.10 W/m.K to 36.23 W/m.K.

Keywords: Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity, Si_3N_4 , Grain Boundary Phases.



Öne Çıkanlar

Bu çalışmada, Si_3N_4 seramiklerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan pahalı Si_3N_4 tozuna alternatif olan Si_3N_4 başlangıç tozları kullanılarak, sabit faz oranında, tane sınır faz miktarı %10 azaltılarak, GPS metodu ile sinterlenmiş ve daha düşük maliyetli başlangıç Si_3N_4 tozu (Silzot) kullanılarak hazırlanmış $Y_2O_3/SiO_2/MgO-Si_3N_4$ seramik sisteminde, tane sınır faz miktarının ve dağılımının termal iletkenliğe etkisi incelenmiştir.

1775 °C'de, 5 bar basınçta, 4 saat gaz basınçlı sinterlenen numunelerde termal difüzyivite, tane sınır fazı azalmasıyla, azalmıştır ve numunelerde tane sınır fazın azatılmasıyla termal difüzyivite 17,29 mm²/sn'den 15,97 mm²/sn'ye ~% 7,64 azalmış, termal iletkenlik 39,10 W/m.K'den 36,23 W/m.K'e, ~% 7,37 azalmıştır.

1. GİRİŞ

Oksit dışı seramiklerdeki ısıl iletim modelleri, ısı iletiminde mikro yapının etkisi ve önemini göstermektedir [1, 2]. Önemli bir yapısal oksit dışı, ileri teknoloji seramiklerinden olan, Si_3N_4 seramiklerin termal iletkenliğini etkileyen parametreleri kontrolle, farklı endüstri uygulamaları için malzeme geliştirmek mümkündür [3-7].

Her ne kadar $\beta-Si_3N_4$ kristallerin teorik ve deneysel elde edilen termal iletkenliği yüksek olsa da, ticari olarak elde edilebilen değerler, tane sınır fazları ve Si_3N_4 kristaldeki kafes kusurları gibi faktörler nedeniyle düşüktür [3]. $\beta-Si_3N_4$ için teorik termal iletkenlik 200 ila 320 W/m.K arasındadır [8]. Si_3N_4 seramiklerin mekanik özellikleri yüksektir, düşük yoğunluğa ve yüksek teorik termal iletkenliğe sahiptirler ve bu nedenle birçok uygulama alanında potansiyel malzemelerdir [9,10]. Ancak sinterleme ile üretiminde kullanılan başlangıç tozlarının pahalı olması ve sinterleme üretimi için maliyetlerin yüksek olması, bu malzemelerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır [11]. Bundan dolayı, daha ekonomik üretime ihtiyaç vardır. Son deneysel çalışmalarda, Si_3N_4 için 100-155 W/m.K termal iletkenlik elde edilmiş olup, bu çalışmaların tümü yaygın kullanılan pahalı başlangıç Si_3N_4 tozları ile üretilmiştir [12-15].

Bu çalışmada ise, yaygın bir şekilde kullanılan pahalı olan başlangıç Si_3N_4 tozundan farklı, daha ekonomik başlangıç tozuyla yüksek yoğunluk elde ederek, yüksek termal iletkenlikte bir yapı oluşumuna katkı için, Y_2O_3 nadir toprak oksit ilavesi kullanılarak, sabit faz oranında, tane sınır fazı miktarındaki değişim %10 olacak şekilde hazırlanmış numunelere, 1775 °C'de, 5 bar basınçta 4 saat sinterleme yapılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tane sınır faz miktarının ve dağılımının termal iletkenliğe etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Üretim

Çalışmada, başlangıç tozu olarak Silzot Si_3N_4 (SKW-Trostberg, AG, Germany) tozlar ($2,55 \mu\text{m}$) öğütülüp tane boyutları azaltılarak ($1,11 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Sinterleme ilaveleri olarak Sigma Aldrich Chemical Co. markalı MgO , Y_2O_3 ve SiO_2 tozlarıyla kompozisyonlar hazırlanmıştır. Bu tozlar, 300 dev/dak hızda 1.5 saat eksenel değirmende (Fritsch-Pulverisette 5 model, Germany) karıştırılmış ve bu çamur, döner bir kurutucuda (Heidolph 4001 model, Germany) kurutulmuştur. Kuru toz karışımları, elenmiş ve şekillendirme için hazırlanmıştır. Bu toz karışımları, 25 MPa basınç uygulanarak el presiyle (Alfa model) şekillendirilip sonrasında soğuk izostatik preste (CIP- model FPG2568/2569, Stansted Fluid Power, UK) numunelere 300 MPa basınç uygulanmıştır. Sinterleme, sabit sıcaklıkta, 5 bar azot gaz basıncında 4 saat boyunca gerçekleştirilmiştir (KCE-FPW 100/150-2200-25).

2.2. Karakterizasyon

Başlangıç Si_3N_4 tozlarının tane boyutu ve dağılımı ölçülmüştür (Malvern Mastersizer 2000). Tozların ve sinterlenmiş numunelerin içerdikleri fazlar X-ışınları difraktometre cihazı (Rigaku Rint 2000 model, Japan, $\text{CuK}\alpha$ $\lambda=1.54056\text{\AA}$, 40 kV, 1 °C /dak.) ile belirlenmiştir. α ve β - Si_3N_4 fazlarının yaklaşık oranlarını hesaplamak için α - Si_3N_4 için ve β - Si_3N_4 için sırasıyla, (102)/(210) ve (101)/(210) düzlemleri pik şiddetleri kullanılarak, Eşitlik (1) ile hesaplama yapılmıştır [16].

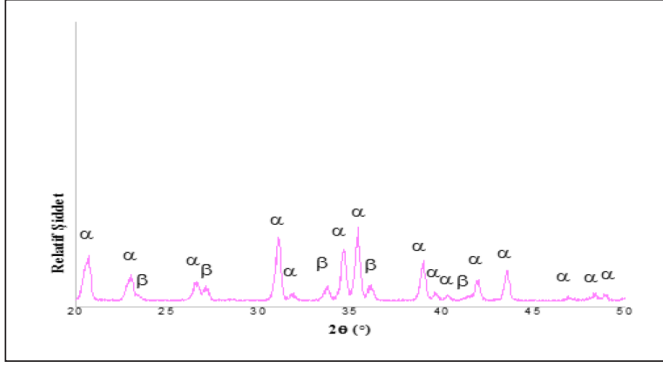
$$I\beta / (I\alpha + I\beta) = 1 / [1 + K ((1 / W\beta) - 1)] \quad (1)$$

Eşitlik 1'de $I\alpha$ ve $I\beta$, sırasıyla α ve β - Si_3N_4 fazlarının pik şiddetleridir. $W\beta$, β - Si_3N_4 ağırlık kesri olup, K, orantı sabiti, β (101) / α (102) ve β (210) / α (210) kırınımaları için sırası ile 0,518 ve 0,544 alınmıştır. Numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet metodu ile (ASTM-C373) yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri için SEM (SEM Zeiss SUPRA 50 VP, Japan) kullanılmıştır [17]. Termal difüzyon lazer-Flaş cihazıyla (Netzsch LFA-457 model, Germany) ölçülmüştür, [18]. Cp değerleri 0,7 J/g.K alınmıştır [19].

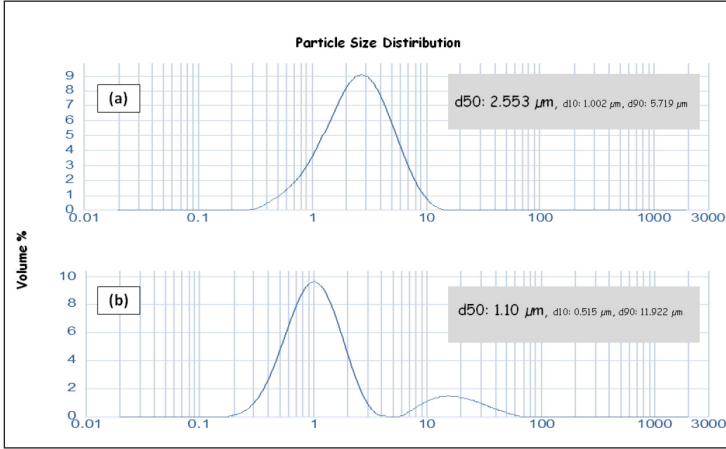
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Başlangıç Toz Karakterizasyon Sonuçları

Başlangıç Si_3N_4 tozlarının XRD paternleri Şekil 1'de verilmiştir. Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan, α - β oranları % 10 β fazı, % 90 α olup, Si_3N_4 tozların tane boyut dağılım grafikleri Şekil 2'de verilmiştir.

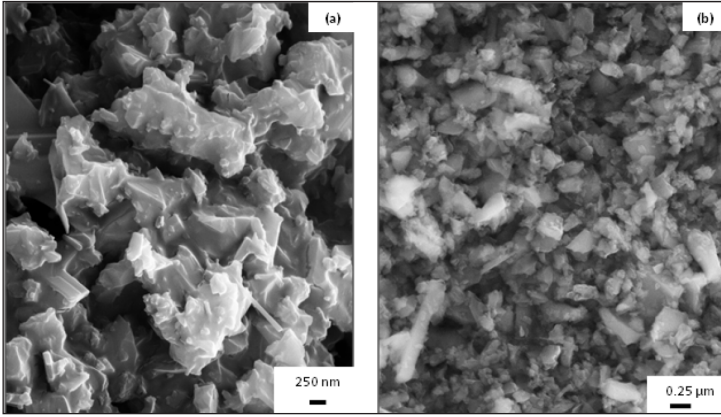


Şekil 1. Başlangıç Si_3N_4 tozun XRD paterni



Şekil 2. (a) Öğütülmemiş, (b) 6 saat öğütülmüş Si_3N_4 tozların tane boyut dağılımı grafikleri

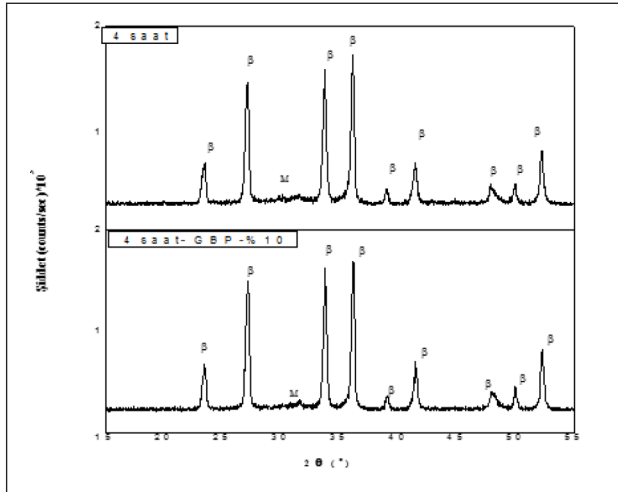
Öğütülmeyen toz ortalama tane boyutu $2,55 \mu m$ ve dar tane boyut dağılımlı olup (Şekil 2), 6 saat öğütülme sonucu elde edilen Si_3N_4 toz tane boyutu ortalama $1,11 \mu m$ ve geniş tane boyut dağılımlıdır. Öğütme uygulanmasıyla, toz tane boyutu neredeyse yarı yarıya indirilmiştir. Si_3N_4 tozlarının SEM görüntüleri, Şekil 3'de verilmiştir. Silzot tozunun köşeli tanelerden oluştuğu görülmektedir. 6 saat öğütülen tozun tane boyutunun öğütme sonucu incelendiği görülmektedir.



Şekil 3. (a) Öğütülmemiş ve (b) 6 saat öğütülmüş Si_3N_4 tozunun SEM görüntüleri

3.2. Yoğunluk ve Faz Analizi Sonuçları

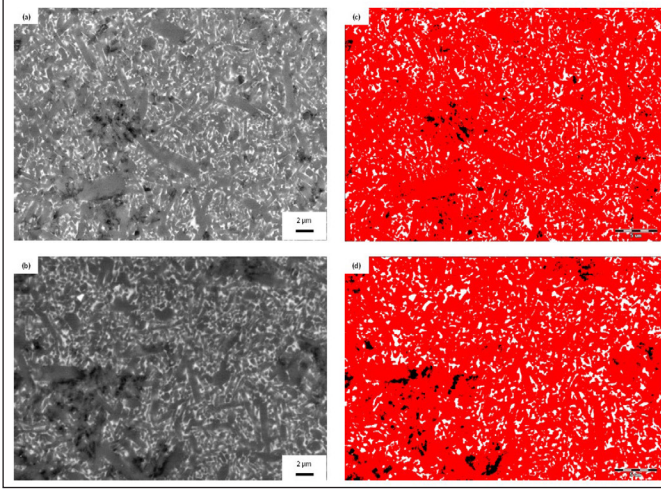
Üretilen numunelerin XRD paternleri Şekil 4'de verilmiştir. Tane sınır fazı azaltılmamış ve azaltılmış numunelerin her ikisinin de yoğunluğu $3,24 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüş, tane sınırı fazının azalması ile yoğunlukta değişim gözlenmemiştir. Yoğunluklar aynı olmasına rağmen, açık porozite ve ağırlık kaybı azalmıştır. Sinterlenmiş numunelerin XRD paternlerinde $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 'dan başka, kristalin Melilit ($\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_3\text{N}_4$ (PDF#76-0724, Tetragonal, P-421m (113)) fazları da görülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. Numunelerin XRD paternleri *(M: Melilit ($\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_3\text{N}_4$))

3.3. Mikroyapı Sonuçları

Numunelerin mikro yapı görüntüleri ve bu mikro yapı görüntülerin farklı renklere dönüştürülmesiyle elde edilmiş görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir. Sıvı fazın miktarını belirlemek amacıyla yapılan görüntü analizleri sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 5. (a) Tane sınırı fazı azaltılmış, (b) azaltılmamış numunelerin mikro yapı görüntüleri (c) Tane sınır fazı azaltılmış ve (d) azaltılmamış numunelerin, mikro yapı görüntülerinin farklı renge dönüştürülmüş görüntüleri

Tablo 1. Yoğunluk, XRD, görüntü analizi, oda sıcaklığında termal difüzyon ve termal iletkenlik sonuçları

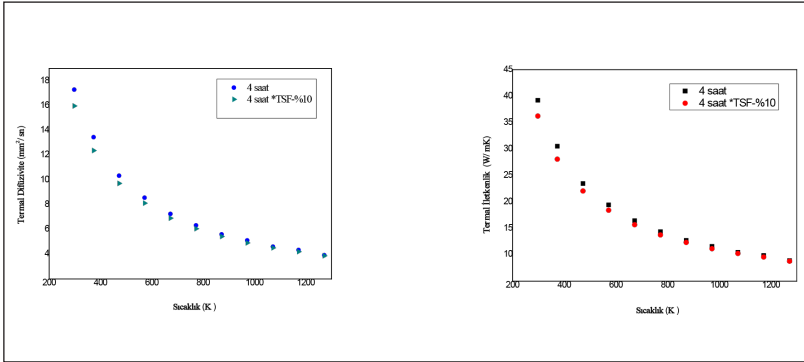
Numune	Sinterleme Süresi (saat)	Yoğunluk (g/cm^3)	A.P. ^(a) %	A.K. ^(b) %	Por %	Sıvı Faz %	Si_3N_4 %	XRD	Termal Diffüzyon (RT ^(c)) (mm^2/sn)	Termal İletkenlik (RT ^(c)) (W/mK)
Normal	4	3,24	0,46	6,37	2,2	11,83	85,98	M ^(d)	17,29	39,10
*TSF -%10	4	3,24	0,30	5,12	0,87	10,6	88,53		15,97	36,23

* TSF Tane Sınır Fazı (a) Açık Porozite (b) Ağırlık Kaybı (c) Oda Sıcaklığı (d) (M: melilit ($Y_2Si_3O_3N_4$))

Tane sınırı fazı azaltılmış numunedeki porozite miktarı (% 0.87), tane sınırı fazı azaltılmamış numunedeki (% 2.2), daha düşüktür. Tane sınır fazının azaltılmasıyla sıvı faz miktarı % 11,83'den % 10,6'a, ~% 10,40 azalmıştır (Şekil 5 ve Tablo 1).

3.4. Termal Analiz Sonuçları

Numunelerin sıcaklığa bağlı termal difüzyivite grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 6. Numunelerin termal difüzyivite (a) ve termal iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi (b)

1775 °C'de, 5 bar basınçta, 4 saat sinterlenen numunelerde termal difüzyivite, tane sınır fazın azalmasıyla numunelerde termal difüzyivite 17,29 mm²/sn'den 15,97 mm²/sn'ye ~% 7,64 azalmıştır.

Yoğunluklar eşit olmasına rağmen, termal iletkenlik 39,10 W/m.K'den 36,23 W/m.K'e, ~% 7,37 azalmıştır.

Tüm numunelerde sıcaklığın artışı ile termal difüzyivite azalmıştır. Termal iletim, seramik sistemlerde fononların hareketiyle sağlanmaktadır. Kristal yapının karmaşık olup olmamasına, kristal hatalarına ve tane sınır miktarına bağlı olarak bu fononlar saçılır ve ısı taşınımını azaltır [20, 21]. Sıcaklık arttıkça, düşük dalga boya sahip fononlar ısı enerjisi taşınımında daha etkilidir. Fononların ortalama serbest yolunu azaltan Umklapp prosesi ve yapıdaki hatalar nedeni ile saçılma artar [22, 23] ve termal iletkenlik düşer. Tane sınır fazın kristalin olması, düzenli yapıdan dolayı, fononların ortalama serbest yollarını artırır ve termal difüzyivite artar [21, 24]. Tane sınır fazı azalınca, başka bazı değişimlerin de gerçekleşmiş olma ihtimali nedeniyle, termal difüzyivite önemli oranda artmamış olabilir [25]. Ayrıca mikro yapı görüntülerinde tane boyutlarına bakıldığında farklı boyutlarda taneler görülmektedir. Tane boyutu 1µm'den küçük olduğunda termal iletkenlik, hem tane sınır camısı fazından hem de kafes oksijeninden etkilenir. Termal iletkenlik, tane boyutu 1µm den büyük olduğunda, camısı fazdan değil ancak kafes oksijeninden etkilenir [26]. Tane sınırı fazın azaltılması sonucunda, sıvı faz miktarının da azaldığı görülmüştür. Mikro yapıda tane sınır fazlarının bir ağ oluşturmadığı

görülmektedir. Düşük termal iletkenlikli bir ikinci faz dağılımı, matris tanelerin çevresinde sürekli ise termal iletkenliği düşürürken, ayrı dağılım durumunda termal iletkenlik çok etkilenmez [27]. Termal iletkenliği etkileyen sözü edilen birçok parametrenin etki dereceleri açısından araştırmadaki farklılıklar tane sınır fazlarının tek başına termal iletkenliği büyük ölçüde direkt olarak etkilemediğini yani başka bir ifadeyle, tane sınırı fazlarının, sistemdeki en baskın saçılım mekanizması olmadığı söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Si_3N_4 seramiklerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan pahalı Si_3N_4 tozuna alternatif olan Si_3N_4 başlangıç tozları kullanılarak, içyapıyı değiştiren, tane sınır faz parametresinin, Si_3N_4 esaslı seramiklerinin mikroyapısına ve termal iletkenliğine etkisi araştırılmış ve şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Tane sınırı fazın azaltılması sonucu sıvı fazın miktarı azalmıştır.
- Termal difüzyon hızı, tane sınırı fazının azalmasıyla, $17,29 \text{ mm}^2/\text{sn}$ 'den $15,97 \text{ mm}^2/\text{sn}$ 'ye $\sim 7,64$ azalmıştır.
- Termal iletkenlik $39,10 \text{ W/m.K}$ 'den $36,23 \text{ W/m.K}$ 'e, $\sim 7,37$ azalmıştır.
- Tüm numunelerde sıcaklığın artışı ile termal difüzyon hızı azalmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Pınar UYAN'ın "Yüksek Isıl İletkenliğe Sahip Si_3N_4 Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezinin bir bölümüdür ve '1004F93 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü" tarafından desteklenmiştir.

Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): Pınar UYAN (%60), Servet TURAN (%40)

Veri Toplanması (Data Acquisition): Pınar UYAN(%80), Servet TURAN (%20)

Veri Analizi (Data Analysis): Pınar UYAN (%80), Servet TURAN (%20))

Makalenin Yazımı (Writing Up): Pınar UYAN(%100), Servet TURAN (%0)

Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): Pınar UYAN (%100)

KAYNAKLAR

- [1] M. Kitayama, K. Hirao, A. Tsuge, K. Watari, M. Toriyama, and S. Kanzaki, "Thermal Conductivity of β -Si₃N₄: II, Effect of Lattice Oxygen," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004.
- [2] K. Watari, "High thermal conductivity non-oxide ceramics," *Nippon Seramikku Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal Ceram. Soc. Japan*, 2001.
- [3] K. Hirao, Y. Zhou, H. Hyuga, T. Ohji, and D. Kusano, "High thermal conductivity silicon nitride ceramics," in *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2012, pp. 380–384.
- [4] W. D. Callister, *Wiley: Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition - William D. Callister, David G. Rethwisch*, 2010.
- [5] G. P. Srivastava, "Theory of thermal conduction in nonmetals," *MRS Bull.*, vol. 26, no. 6, pp. 445-450., 2001.
- [6] K. Watari and S. L. Shinde, "High Thermal Conductivity Materials," *MRS Bull.*, pp. 440–441, 2001.
- [7] P. Uyan and S. Turan, "Effect of Cooling Cycle after Sintering on the Thermal Diffusivity of Y₂O₃ Doped Si₃N₄ Ceramics," *Univers. J. Mater. Sci.*, 2018.
- [8] J. S. Haggerty and A. Lightfoot, "Opportunities for Enhancing the Thermal Conductivities of SiC and Si₃N₄ Ceramics Through Improved Processing," 2008, pp. 475–487.
- [9] F. L. Riley, "Silicon Nitride and Related Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004.
- [10] S. Hampshire, "Silicon nitride ceramics - review of structure, processing and properties," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 2007.
- [11] E. AYAS, "Mechanical, Electrical and Thermal Properties of α/β SiALON-SiC Composites Fabricated by Gas Pressure Sintering Method," *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A - Appl. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 812-812, 2016.
- [12] K. Watari, K. Hirao, M. E. Brito, M. Toriyama, and S. Kanzaki, "Hot isostatic pressing to increase thermal conductivity of Si₃N₄ ceramics," *J. Mater. Res.*, vol. 79, pp. 2485-2488., 1999.
- [13] K. Watari, K. Hirao, M. Toriyama, and K. Ishizaki, "Effect of Grain Size on the Thermal Conductivity of Si₃N₄," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004.
- [14] K. Hirao, K. Watari, H. Hayashi, and M. Kitayama, "High thermal conductivity silicon nitride ceramic," *MRS Bull.*, 2001.
- [15] N. Hirotsaki, Y. Okamoto, M. Ando, F. Munakata, and Y. Akimune, "Thermal conductivity of gas-pressure-sintered silicon nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 79, pp. 2978-2982., 1996.
- [16] C. P. Gazzara and D. R. Messier, "Determination Of Phase Content Of Si₃N₄ By X-Ray Diffraction Analysis," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1977.
- [17] J. Goldstein et al., "Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis - Third Edition," *Springer*, 2003.
- [18] A. American and N. Standard, "Standard Test Methods for thermal diffusivity of solids by the flash method," *Am. Soc. Test. Mater.*, 1997.
- [19] K. Watari, Y. Seki, and K. Ishizaki, "Temperature dependence of thermal coefficients for HIPped silicon nitride," *Nippon Seramikku Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal Ceram. Soc. Japan*, vol. 97, no. 2, pp. 174-181, 1989.
- [20] W. D. Kingery, "Thermal Conductivity: XII, Temperature Dependence of Conductivity for Single-Phase Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, 1955.
- [21] D. W. Richerson, *Modern Ceramic Engineering*. 2005.
- [22] R. J. Bruls, H. T. Hintzen, and R. Metselaar, "A new estimation method for the intrinsic thermal conductivity of nonmetallic compounds," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2005.
- [23] H. Yokota, H. Abe, and M. Ibukiyama, "Effect of lattice defects on the thermal conductivity of β -Si₃N₄," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2003.
- [24] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to ceramics (2nd edition)*. 1976.
- [25] S. R. Kushan, I. Uzun, B. Dogan, and H. Mandal, "Experimental and finite element study of the thermal conductivity of α -SiALON ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2007.
- [26] M. Kitayama, K. Hirao, M. Toriyama, and S. Kanzaki, "Thermal Conductivity of β -Si₃N₄: I, Effects of Various Microstructural Factors," *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004.
- [27] Y. Lin, X. S. Ning, H. Zhou, K. Chen, R. Peng, and W. Xu, "Study on the thermal conductivity of silicon nitride ceramics with magnesia and yttria as sintering additives," *Mater. Lett.*, vol. 57, pp. 15-19., 2002.

