



Derleme Makalesi / Review Article

**MECHANICAL BEHAVIOURS OF UNIDIRECTIONALLY SOLIDIFIED
OXIDE MATERIALS**

Serkan ABALI*

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Endüstriyel Seramik Bölümü, ÇANAKKALE

Geliş/Received: 06.07.2006 Kabul/Accepted: 25.05.2007

ABSTRACT

Most conventional ceramics and ceramic composites are produced by using the powder sintering method. For this reason they contain many impurities and there are many cases of amorphous phases forming at grain boundaries. In many cases these amorphous phases and grain boundaries effectively act to increase fracture toughness and strength at room temperature but there are microstructural factors which might cause a deleterious effect on high temperature strength and creep properties. The oxide ceramic single crystal materials eliminates these microstructural factors by controlling its stable high temperature microstructure. In this paper the microstructural and high temperature behaviours such as the flexural strength, thermal stability and creep characteristics of single crystal oxide materials are examined.

Keywords: Oxide single crystal, grain boundary, amorphous phase, mechanical behaviour.

PACS number/numarası: 81.05.Je, 81.10.Fg, 81.30.Fb.

TEK YÖNLÜ KATILAŞTIRILMIŞ OKSİT MALZEMELERİN MEKANİKSEL DAVRANIŞLARI

ÖZET

Pek çok konvansiyonel seramik ve seramik kompozitler toz sinterleme metodu kullanılarak üretilirler. Bu nedenle tane sınırlarında pek çok amorf faz ve empürite bulundurulur. Amorf faz ve tane sınırları oda sıcaklığındaki kırılma tokluğu ve mukavemetin artmasında etkilidirler. Fakat bu mikroyapısal faktörler yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme karakteristikleri üzerinde zararlı etkiye sahiptirler. Oksit seramik tek kristal malzemeler stabil yüksek sıcaklık mikroyapılarının kontrolü ile bu mikroyapısal faktörleri elimine ederler. Bu çalışmada, tek kristal oksit malzemelerin eğilme mukavemeti, termal stabilite ve sürünme karakteristikleri gibi yüksek sıcaklıktaki mikroyapısal davranışları incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Oksit tek Kristal, tane sınırı, amorf faz, mekaniksel davranış.

1. GİRİŞ

Endüstride sıcak izostatik pres yada sıcak pres gibi toz sinterleme metodları ile üretilmiş oksit seramik kompozit malzemeler (Al_2O_3 -MgO, ZrO_2 - Y_2O_3 vd) tane sınırları içermelerinden dolayı çok yüksek saflıkta olsalar da, tane sınırlarında yabancı atomların birikimine ve yüksek sıcaklık uygulamalarında elverişsiz olan camı fazın oluşumuna neden olurlar. Bu problemi gidermenin yolu bu oksit malzemeleri tane sınırsız elde etmektir. Bunun için, mevcut fazın tek kristal olması gerekir. Günümüzde yüksek sıcaklarda üstün mekanik özellikler gösteren oksit seramikler tek

* sabali@comu.edu.tr, tel: (286) 416 77 05

yönlü katılaştırma mekanizmaları ile elde edilirler. Oksit seramikler, kristal yapılarından kaynaklanan oksidasyon direnci, kimyasal ve termal stabilite gibi özelliklere sahiptirler. Buna rağmen termal şok dirençleri zayıf ve çatlak büyümesi ile malzeme gerilmesi sonucu istenmeyen kırılmalar meydana gelebilir. Seramik oksit kompozitlerin termomekaniksel stabilitelelerinin geliştirilmesi, onların ötektik ergiyikten katılaştırılmaları ile sağlanmıştır. Tek yönlü katılaştırma metodu ile üretilen ötektik kompozitler, yüksek sıcaklıklarda mükemmel mukavemet ve sürtünme direncine sahiptirler. Ötektiklerin tane sınırları karakteristiklerinin güçlendirilmesi özellikle uzun süreli yüksek sıcaklık uygulamaları şartlarında gereklidir [1].

Yönlü katılaştırılmış oksit seramikler, yüksek sıcaklık uygulamaları için mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla, önceki çalışmalarda araştırılmıştır [2,3]. Örneğin tek yönlü katılaştırılmış Al_2O_3/YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) oksit seramiğin yüksek sıcaklıklarda üstün eğilme mukavemeti, sürtünme direnci olduğu ve yüksek sıcaklık yapısal malzemelerine aday olduğu ifade edilmiştir [4,5]. Bu malzemeler mekanik özellikleri bozan, Al_2O_3 ile YAG arasında tane sınırları yada kolonilerini içermezler [6]. Ayrıca Al_2O_3/GAP ($GdAlO_3$), Al_2O_3/EAG ($Er_3Al_5O_{12}$) gibi oksit seramiklerin tane sınırı yada koloni içermedikleri de görülmüştür. Bu malzemeler tane sınırsız tek kristal Al_2O_3/YAG , Al_2O_3/GAP , Al_2O_3/EAG oksit bileşenlerini birlikte içeren yeni bir mikroyapıya sahiptirler. Bu nedenle bu tip tek kristaller, hava atmosferinde $1700^\circ C$ 'de yüksek sıcaklık mukavemet karakteristikleri, sürtünme direnci, üstün oksidasyon direnci ve termal kararlılığa sahiptirler. Bu nedenle çok yüksek sıcaklıklardaki güç jeneratör sistemleri ve gaz türbinleri gibi son zamanlarda önem kazanan birkaç farklı uygulamada kullanılmaktadırlar [7-10].

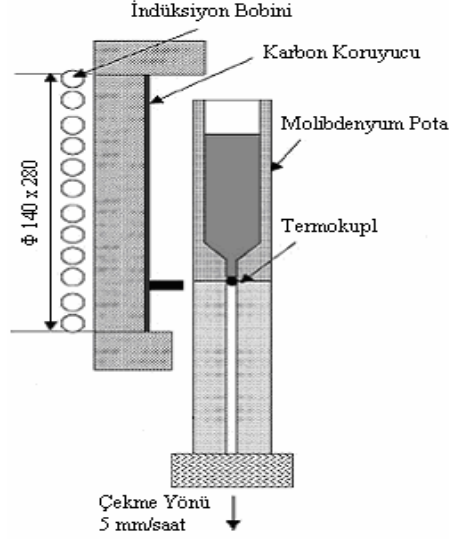
Bu çalışmada son zamanlarda büyük gelişim gösteren ve yukarıda tanımlanan yönlü katılaştırılmış seramik oksitlerin mikroyapısal karakterizasyonları ile yüksek sıcaklık uygulamalarındaki performansları açısından önemli olan mekaniksel ve fiziksel özellikleri (mukavemet, sürtünme direnci, çatlak ilerlemesi) incelenmiştir. Mikroyapı ve üretim süreci arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla bu tür malzemelerin tek yönlü katılaştırma davranışları da araştırılmıştır.

2. OKSİT TEK KRİSTALLERİN ÜRETİMİ

Nakagawa v.d. [13] Al_2O_3 , Y_2O_3 tozlarını $Al_2O_3/Y_2O_3 = 82/18$ mol olacak şekilde homojenliği sağlamak amacıyla karıştırmışlar ve daha sonra bu karışımı (çamur) döner kurutucularda kurutarak etanolünden uzaklaştırmışlardır. Tek yönlü katılaştırma için Bridgman tipi fırın Şekil 1.'de görülmektedir [13]. Ergitme Mo kalıp içinde sürdürülerek levha şekilli ingotlar meydana getirilir. Mo kalıp yüksek frekanslı indüksiyon ile ısıtılır. Levha şekli, malzemenin iki parçaya ayrılan Mo kalıp içersine yerleştirilmesi ile meydana getirilir. İkiye ayrılan kalıplardan biri diğeri ile aynı konfigürasyondadır (Boşluk boyutu, $44mm \times 120mm \times 3mm$). Boşluklu Mo kalıbın dış görünümü $26mm$ çap ve $150mm$ yüksekliği olan bir sütun biçimindedir. İki adet boşluklu Mo kalıp $210mm$ uzunluk, $2mm$ incelik ve $57mm$ dış çapa sahip vakum çemberindeki Mo silindirin içersine yerleştirilir. Yaklaşık $1930^\circ C$ 'ye ulaşıldıktan sonra bu sıcaklıkta 30 dakika beklenilir ve Mo'un silindiri $5mm/saat$ 'lik bir hızla alçaltılarak tek yönlü katılaştırılır. Şekil 2.'de $45mm$ genişlik, $90mm$ yükseklik ve $6mm$ incelikteki Al_2O_3/YAG plaka görülmektedir [13]. Bu plaka daha sonra servis şartları için elmas çarklı makine ile parlatılır. Daha sonra her bir malzemenin yüzeyi incelti olarak düzeltilir.

Günümüzde oksit tek kristaller Bridgman metodu dışında lazer tekniği yada EFG (ince tabaka beslemeli büyütme) yöntemi ile de üretilmektedirler. Üretim yöntemi kristalin kullanım alanına göre değişmektedir. Bridgman metodu, nispeten düşük sıcaklık gradyanı, düşük büyütme oranı ve genellikle Al_2O_3 matrisi içersindeki ötektik ZrO_2 ve Y_2O_3 ötektik kolonilerini içeren bir mikroyapının (tek kristal oksit seramiğin) elde edilmesinde kullanılır. Ando [14] v.d. bu metotta üretimi etkileyen en önemli kriterin ergiyiğin katılaştırılma esnasındaki soğutma hızı olduğunu gözlemlemiştir. Ergiyik içinde yeterli heterojen çekirdek mevcutsa katılma, katılma sıcaklığında başlar. Isıl duraklama veya sabit sıcaklık ergime gizli ısısının açığa çıkması sonucu

meydana gelir. Ergime gizli ısı bütünü sıvı katılaşıma ve daha fazla ısı çıkışı mümkün olmayana kadar, sıvıyı katılaşıma sıcaklığında tutar. Bu şartlar altında büyüme düzlemseldir. Toplam katılaşıma zamanı, aşırı ısıtılmış sıvının özgül ısı ve ergime gizli ısılarının her ikisinde atılması için gerekli toplam zamandır. Zayıf çekirdeklenme nedeniyle alt soğuma meydana gelmişse soğuma eğrisi katılaşıma sıcaklığının altına iner. Sonuçta katı çekirdeklendikten sonra büyüme meydana gelir. Buna karşın, ergime gizli ısı alt soğutulmuş sıvı tarafından absorbe edilir ve sıvının sıcaklığını katılaşıma sıcaklığına yükseltir [25]. Aynı zamanda soğuma oranı aynı zamanda kristalin üzerindeki mekanik testlerin yapılabilmesi için gerekli boyut kriterlerini de belirleyebilir. Bununla birlikte Yasuda v.d. Al_2O_3 -YAP (YAlO₃) sisteminin soğuma eğrilerini çalışmalarında göstermişlerdir [15].



Şekil 1. Tek yönlü katılaştırmada kullanılan Bridgman tipi fırının şematik görünümü [13]

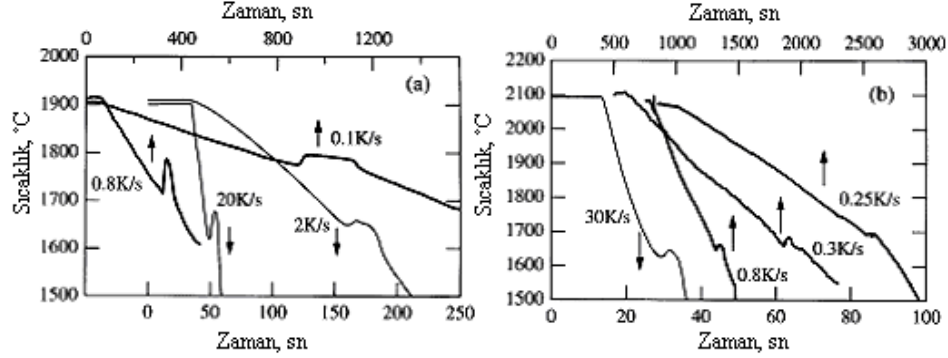
Buna göre, Şekil 3a'dan da görüldüğü üzere 0.1 K/sn soğuma oranı şartlarında çekirdeklenme ve büyüme için gerekli sıcaklığın 1775°C olduğu tespit edilmiştir. Numuneler 20 K/sn ile soğutulduğunda bu sıcaklık, Al_2O_3 -YAP ötektik sıcaklığının da altında olan 1620°C'dir. Numuneler 1 K/sn'den daha az bir soğuma hızı ile soğutulduklarında çekirdeklenme oluşumu 1700°C'nin üzerinde gerçekleşirken, 2 K/sn'den daha çok bir soğutma hızı ile soğutulduklarında 1700°C'nin altında çekirdeklendikleri tespit edilmiştir.



Şekil 2. Levha biçimli Al_2O_3 /YAG ingot [13]

2100°C'den itibaren soğutulan numunelerin soğuma eğrileri Şekil 3b'de görülmektedir. 30 K/sn'lik bir soğutma hızında çekirdeklenme oluşumu 1625°C civarında gerçekleşmektedir. 0.3 K/sn'lik bir soğutma hızında 1700°C olan Al_2O_3 -YAP ötektik sıcaklığının daha üstündeki bir

sıcaklıkta dahi çekirdeklenme oluşmamaktadır. Numuneler 2100°C'den itibaren soğutulduğunda ve 1.8 kilostoke'luk bir akış hızında ve 1720°C'de bekletildiği zaman katılaşma başlamamıştır.



Şekil 3. Al₂O₃/YAP sisteminin soğuma eğrileri (a) 2000°C'den itibaren (b) 2000°C'nin üzerindeki sıcaklıklardan itibaren [15]

3. OKSİT TEK KRİSTAL KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

3.1. Sıcaklığa Bağlı Eğilme Mukavemeti

Şekil 4'de Al₂O₃/YAG tek kristal sisteminin oda sıcaklığından 1800°C'ye kadar olan eğilme mukavemeti, aynı kompozisyondaki sinterlenerek üretilmiş yapı ile karşılaştırılmıştır [16]. Tek kristal oda sıcaklığından 1800°C'ye kadar olan sıcaklıklarda 350-400 MPa'lık 4 noktalı eğilme mukavemetini korumaktadır. Diğer yandan sinterlenmiş yapı ise beklenildiği üzere oda sıcaklığında daha yüksek bir eğilme mukavemeti göstermekte, ancak oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara çıkıldığında eğilme mukavemetinde bir düşüş gözlenmektedir. Bu düşüşün sebebi doğal olarak tane sınırlarında bulunan amorf fazın ergimesinden kaynaklanmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda da sinterlenmiş malzemede 1400°C servis şartlarına kadar mekanik özellikleri düşüren tane büyümesinin gözlemlendiği ifade edilmiştir [8]. Diğer yandan tek kristalde ise 1700°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda dahi hiç tane oluşumuna rastlanmamıştır. Ayrıca 1800°C şartlarında Al₂O₃ ve YAG fazları arasında da taneler arası bölge gözlenmemiştir.

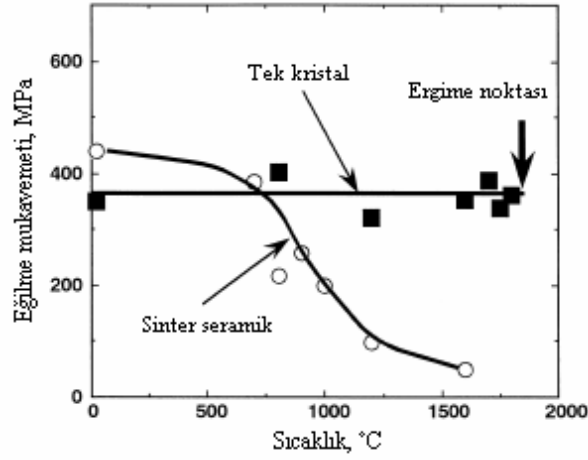
Bazı yazarlar [11, 12, 13], sinter Si₃N₄ seramik, süper alaşımlar ve oksit tek kristallerin oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara kadar sıcaklığa bağlı 4 noktalı eğilme mukavemetleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Al₂O₃/YAG, 300-350 MPa arasındaki eğilme mukavemetini oda sıcaklığından 1800°C'ye kadar sürdürürken Al₂O₃/GAP ise yaklaşık 2 katı mukavemeti 1400°C-1600°C'ye kadar korumaktadır. Günümüzde türbin ağızında kullanılan Ni esaslı tek kristal süper alaşımların en yüksek mukavemeti ancak 800°C civarında görülmektedir. Si₃N₄ seramik ise oda sıcaklığında, oksit tek kristallerden daha yüksek eğilme mukavemetine sahiptir. Fakat 800°C sıcaklık civarına ulaşıldığında yavaş bir şekilde mukavemetinde azalma görülmektedir. Bununla beraber Si₃N₄ seramiğin yüksek sıcaklıklarda zayıf oksidasyon direncine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle kullanımındaki en büyük engel yüksek sıcaklıklardaki oksidatif (oksitleyici) ortamdır. Bunun aksine oksitli tek kristaller yüksek sıcaklıklardaki oksitleyici ortamlarda bilhassa tercih edilirler.

3.2. Yüksek Sıcaklıktaki Sürünme Karakteristikleri

Harada v.d. [17] yönlü katılaştırılmış Al₂O₃/YAG tek kristalinin 1723 K ile 1923 K arasındaki ortam şartlarında sürünme deformasyon direncinin, 300 MPa olduğunu belirlemişlerdir.

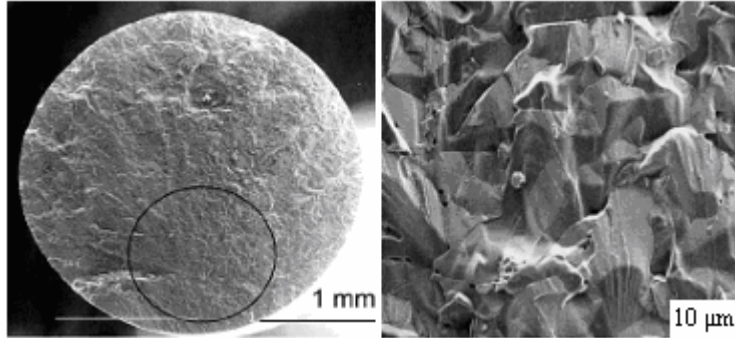
Mechanical Behaviours of Unidirectionally Solidified ...

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ tek kristalinin 1173 K sıcaklık ve 0.06 MPa buhar basıncı şartlarındaki sürünme deformasyon davranışı Şekil 5'den de görülmektedir. Bu şartlar altında dahi mikroyapıda daire içine alınan bölge de dahil olmak üzere gözle görülür bir doformasyon söz konusu değildir. Şekil

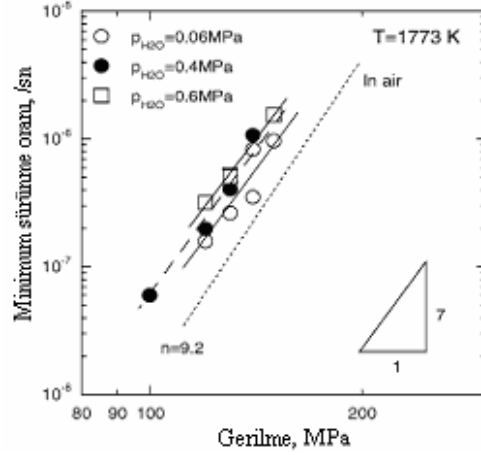


Şekil 4. Sinter $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 'ın aynı kompozisyondaki tek kristal ile sıcaklığa bağlı eğilme mukavemetinin karşılaştırılması [16]

6'da $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ sisteminin 1173 K'de ve çeşitli buhar basıncı şartlarında gerilme-sürünme oranı arasındaki ilişki gözlenmektedir. Buna göre yaklaşık 150 MPa'lık bir gerilme değeri altında ortam buhar basıncı arttıkça sürünme deformasyonu da artmaktadır. Aynı zamanda su buharı basıncı altındaki deformasyon hava şartlarından daha yüksektir. Nakagawa [13] v.d. çalışmalarında $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GAP}$ kristallerin 1700°C'deki hava atmosferinde 0-500 saat arası bekletildikten sonraki ısıl davranışları sonucu mikroyapı analizlerini incelemişlerdir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 'da sıcaklık artışı ile hiçbir tane büyümesi gözlenmezken $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GAP}$ 'da çok az bir tane büyümesi gözlenmiştir ve oksit tek kristallerin her ikisinin de uzunca bir süre hava atmosferindeki yüksek sıcaklığa (1700°C) maruz olması ile boşluksuz, tamamen stabil bir yapıda oldukları tespit edilmiştir. Bu stabilite tek kristal Al_2O_3 , tek kristal YAG ve tek kristal GAP fazlarının ve bu fazların ara yüzeyindeki termodinamik stabilitenin bir sonucudur.



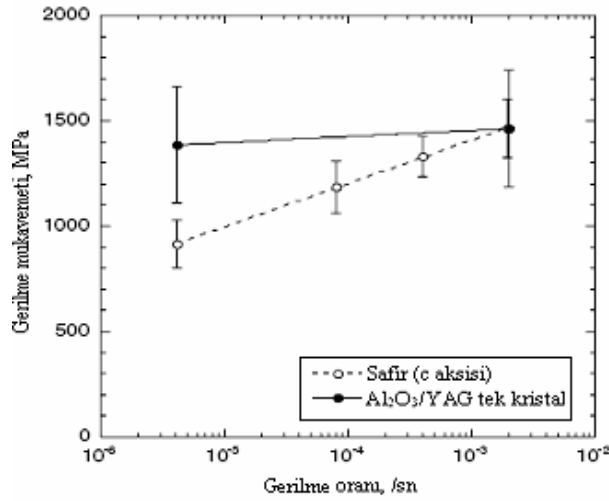
Şekil 5. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ tek kristalinin 1173 K sıcaklık ve 0.06 MPa buhar basıncı şartlarındaki mikroyapısı [18]



Şekil 6. Oksit tek kristalin gerilme sürünme oranı ilişkisi [18]

3.3. Kritik Çatlak İlerlemesi

Safir ve tetragonal ZrO_2 gibi tek kristal oksitlerin mekanik özelliklerini düşüren etkenlerden birisi de kritik çatlak büyümesidir [19,20]. Kritik çatlak büyümesi detaylı bir şekilde Sayir [21] tarafından araştırılmıştır. Şekil 7'de safir tek kristalinin gerilme oranının mukavemete bağlı değişimi c aksisi yönünde gerçekleşirken, Al_2O_3/YAG kristali için bu değişim $1100^\circ C$ 'de sabite yakındır (~ 1400 MPa). Her ne kadar çatlak yayılımının hareket mekanizması bir tartışma konusu olsa da daha düşük gerilme hızında safirdeki mukavemetin azalması çatlak oluşumunun başlamasından kaynaklanmaktadır. Bunun aksine yönlü katılaştırılmış kristalde yüksek sıcaklıkta dahi çatlak yayılımı söz konusu değildir [22] ve bu malzemelerin kritik çatlak ilerlemesine bağlı mukavemetleri de uygulanan yük oranından bağımsızdır.

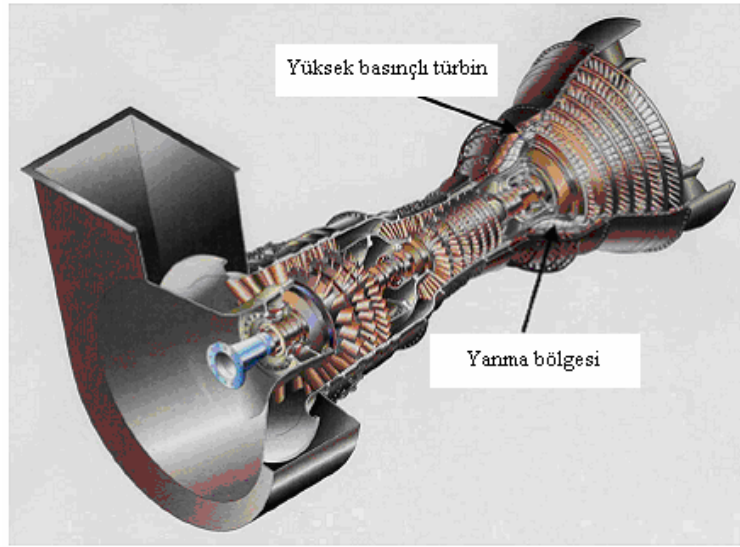


Şekil 7. $1100^\circ C$ 'de hava atmosferinde c-aksisi boyunca yönlendirilmiş safir ve yönlü katılaştırılmış Al_2O_3/YAG tek kristalinin mukavemet-gerilme oranı ilişkisi [21]

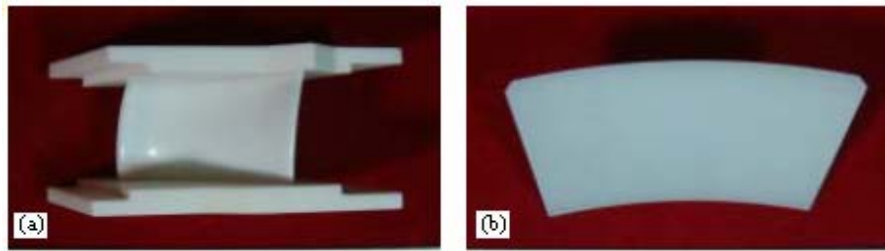
4. İRDELEME

Son zamanlarda büyük bir gelişme gösteren yönlü katılaştırılmış seramik oksitler, en yoğun ve homojen mikroyapıya sahip yapısal malzemelerdir. Bu tür malzemeler üretimde, termal gradyanla katılaştırmayı sağlayan Bridgman metodu ile elde edildiklerinden, bu metod LFZ (lazerle ergitme), EFG (ince tabaka beslemeli büyütme) ve μ -pD (mikron çekme) gibi lazer, RF (radyo frekansı) şeklindeki ısı kaynaklarına sahip metodlardan daha çok tercih edilmektedir.

Oksit tek kristallerin gaz türbin uygulanması ele alındığında, CO_2 ve NO_x gibi kirletici gazların azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılabilmesi açısından gaz türbin yüksek sıcaklık komponentleri olarak kullanılabilir kapasitede oldukları görülmüştür. Şekil 8.'de oksit tek kristallerin türbin nozulu ve ısı kalkan paneli olarak kullanılabilirliği yolcu uçakları gaz türbin sisteminin genel bir görünüşü yer almaktadır. Yönlü katılaştırılmış oksit komponentleri elde edilmeden önce, bunların yerine kullanılan sinter ileri teknoloji seramikleri (oksitler, nitrürler, karbürler) ve Ni alaşımları zayıf yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci gibi özellikleri nedeniyle yakıttan enerji tasarrufu sağlamak ve kirliliği önlemek için yeterli performansı gösterememişlerdir.



Şekil 8. Oksit parçalarının yer aldığı gaz türbin sisteminin genel bir görünüşü [23]



Şekil 9. Yakma sisteminde kullanılan komponentler (a) türbin nozul parçası (nozlu girişinde) ve (b) ısı kalkan paneli (yanma bölgesinde) [24]

Oksit tek kristaller, bu parçaların kullanımıyla termal verimliliği artırmakta ve düşük NO_x 'li yanmayı geliştirebilmektedir. Yanma bölgesinde kullanılan türbin nozulu pervanesi ve ısı kalkan panellerinin dış görünümü Şekil 9'da yer almaktadır. Türbin nozulu $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GAP}$ ve ısı kalkan paneli ise $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ tek kristalden imal edilmiştir.

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ kristalinin hava şartlarında 1700°C 'de 500 saat bekletildikten sonra ve önce temsili boyut değişimi, ağırlığı ve yüzey pürüzsüzlüğü Çizelge 1.'de görülmektedir. Bu kristalin, hava atmosferinde 1700°C 'de 500 saat bekletildikten sonra yüzey pürüzlülüğü, ağırlık ve boyutunda hiçbir değişim gözlenmemekle birlikte, fark edilir bir oksidasyon direncine sahip olduğu da görülmektedir.

Çizelge 1. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ kristalinin 1700°C 'de zamanla pürüzlülük, boyut ve ağırlıklarında meydana gelen değişim [13]

Boyut	0 saat	250 saat	500 saat	Boyut değişimi
Uzunluk (mm)	43.971	43.975	43.977	0.006
En (mm)	10.614	10.620	10.614	0.000
Ağırlık (gr)	26.783	26.782	26.770	-0.012
Pürüzlülük (μm)	0.46	0.56	0.77	0.31

Bu malzemelerin mükemmel yüksek sıcaklık karakteristiklerine sahip olmalarının sebebi her bir tek kristal fazın sürekliliğini her şartta koruyan eşsiz bir mikroyapıya sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

5. SONUÇLAR

Tek yönlü katılaştırılmış bu yeni malzemelerin mekanik özellikleri üretim yöntemi ve mikroyapı özelliklerine bağlıdır. Yönlü katılaştırdıkları için bu malzemeler yapı içerisinde homojen bir fiziksel özellik dağılımı gösterebilmekte ve tek kristal olarak üretildikleri için de tane sınırsız, empürite ve amorf faz oluşmaksızın ileri teknoloji uygulamaları ile sinterlenmiş oksit seramiklerden, çok daha yüksek sıcaklık uygulamalarında deformasyona uğramaksızın kullanılabilirler. Özellikle $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ yönlü katılaştırılmış malzemelerde mikron altı seviyelerde fazlar arası boşluğa ulaşılabilen ve bu sayede malzeme 1900 K 'lik ortam sıcaklığında 2 GPa ' kadar mukavemet gösterebilmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ tek kristal aynı kompozisyondaki sinterlenmiş yapısına göre yaklaşık 13 kat daha fazla akma direncine sahiptir. Bunun yanında farklı kompozisyondaki $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EAG}$ ise 1900 K 'de en iyi kayma direnci gösteren oksit malzeme olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bu mikroyapılar ötektik noktalarına yakın sıcaklıklarda bile oldukça homojen bir yapı özelliği göstermektedirler. Bu malzemeler son zamanlarda özellikle gaz türbin motorlarının nozullarında ve yakma sistemlerinde çığır açmışlar, sinter Si_3N_4 seramik ve Ni alaşımları gibi malzemelerin yerini almışlardır. Ancak ülkemizde TAI (TUSAŞ Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.)'de dahil olmak üzere henüz üretilmeyen bu tür malzemeler yurt dışından temin edilmektedir. Bu nedenle kristal mühendisliğinin hem üniversiteler hem de sanayi bazında geliştirilmesi için gerekli tanıtım seminerleri verilerek, bu alandaki araştırmalar artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Calderon-Moreno, J. M., Yoshimura, M., Nanocomposites From Melt in the System $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}/\text{ZrO}_2$, Scripta Materialia, 44, 2153-2156, 2001.
- [2] Pastor, J. Y., Paza, P., Llorca, J., Pena, J. I., Merino, R. I. and Orera, V. M., Mechanical properties of directionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (Y_2O_3) eutectics. Mater. Sci. Eng., A308, 241-249, 2001.

- [3] Martinez Fernandez, J., Sayir, A. and Farmer, S. C., High temperature creep deformation of directionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, *Acta Mater.*, 51, 1705–1720, 2003.
- [4] Mah, T. and Parthasarathy, T. A., Processing and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) eutectic composite. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 11, 1617–1627, 1990.
- [5] Parthasarathy, T. A., Mah, T. and Matson, L. E., Creep behavior of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ eutectic composite. *Ceram. Eng. Soc. Proc.*, 11, 1628–1638, 1990.
- [6] Parthasarathy, T. A., Tai, M. and Matson, L. E., Deformation behavior of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ eutectic composite in comparison with sapphire and YAG, *J. Am. Ceram. Sci.*, 76, 29–32, 1993.
- [7] Waku, Y., Ohtsubo, H., Nakagawa, N. and Kohtoku, Y. Y., Sapphire matrix composites reinforced with single crystal YAG phases. *J. Mater. Sci.*, 31, 4663–4670, 1996.
- [8] Waku, Y., Nakagawa, N., Wakamoto, T., Ohtsubo, H., Shimizu, K. and Kohtoku, Y., High-temperature strength and thermal stability of a unidirectionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ eutectic composite, *J. Mater. Sci.*, 33, 1217–1225, 1998.
- [9] Waku, Y., Nakagawa, N., Wakamoto, T., Ohtsubo, H., Shimizu, K. and Kohtoku, Y., The creep and thermal stability characteristics of a unidirectionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ eutectic composite, *Mater. Sci.*, 33, 4943–4951, 1998.
- [10] Nakagawa, N., Waku, Y., Wakamoto, T., Ohtsubo, H., Shimizu, K. and Kohtoku, Y., High temperature properties and thermal stability of a unidirectionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ eutectic composites. *J. Jpn. Inst. Met.*, 64, 101–107, 2000.
- [11] Yoshida, M., Tanaka, K., Kubo, T., Terazone, H. and Tsuruzone, S., Development of ceramic components for ceramic gas turbine engine (CGT302), In *Proceedings of the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, The American Society of Mechanical Engineers, pp. 1–8, 1998.
- [12] Erickson, G. L., The development and application of CMSX-10. *The Minerals, Metals & Materials Society*, pp. 35–44, 1996.
- [13] Nakagawa, Y., Ohtsubo, Mitani, A., H., Shimizu, K. and Waku, Y., High temperature properties and thermal stability for melt growth composite. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 25, 1251–1257, 2005.
- [14] Ando, T., Shiohara, Y., *Journal of American Ceramic Society*, 74, 410, 1991.
- [15] Yasuda, H., Ohnaka, I., Mizutani, Y., Waku, Y., *Sci. Tech. Adv. Materials*, 2, 67–71, 2001.
- [16] Waku, Y., Sakuma, T., *Journal of the European Ceramic Society*, 20, 1453–1458, 2000.
- [17] Harada, Y., Suzuki, T., Hirano, K., Waku, Y., *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 2215–2222, 2004.
- [18] Harada, Y., Suzuki, T., Hirano, Y., Nakagawa, K., Waku, N., *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 1275–1283, 2005.
- [19] Newcomb, S. A., Tressler, R. E., *Journal of American Ceramic Society*, 76, 2505, 1993.
- [20] Ridruejo, A., Pastor, J. Y., Llorca, J., Sayir, A., Orera, V. M., *Journal of American Ceramic Society*, 88, 3125, 2005.
- [21] Sayir, A., *Computer-aided design of high temperature materials*, Oxford: Oxford University Press; 1999.
- [22] Pastor, J. Y., Llorca, J., Salazar, A., Oliete, P. B., Francisco, I., Pen˜a, J. I., *Journal of American Ceramic Society*, 88, 1488, 2005.
- [23] Kobayashi, K., Waku, Y., Nakagawa, Y., Yokoi, S., *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, Tokyo, Japan, 2003.
- [24] Waku, Y., Nakagawa, Y., Kobayashi, K., Hirano, K., Yokoi, S., *European Congress on Advanced Materials and Processes*, Euromat, Prague, Czech Republic, 2005.
- [25] Askeland, D. R., *The Science and Engineering of Materials*, University of Missouri-Rolla, 1998.