

## Tetragonal Zirkonya Katkılı $Cr_3C_2$ -NiCr Sermet Kompozitlerin Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri

Ali ÖZER, Yahya Kemal TÜR

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze-Kocaeli-Türkiye  
E mail: aozer@gyte.edu.tr

Geliş Tarihi: 24.10.2012; Kabul Tarihi: 11.11.2013

### Özet

#### Anahtar kelimeler

3Y-TZP  
SEM  
Organik-Sterik  
Yakalama  
Sinterleme  
Kırılma

Sermetler yaygın olarak kesici takım ucu olarak kullanılmaktadır. Buna yönelik ticari markalar da farklı isimler altında patentlenmiş ve kullanıma sunulmuştur. Bu çalışmada, tetragonal zirkonya katkılı  $Cr_3C_2$ -Ni(Cr) sermetlerin sinterlenme davranışları ve bu katkıların mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Sinterlenme davranışlarının belirlenmesi için üç farklı sıcaklıkta kinetik çalışmaları yapılmış ve oluşan fazlar XRD ve SEM ile incelenmiştir. Katkıların mekanik özelliklere etkisini incelemek için elastik modül, sertlik ve kırılma tokluğu deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, sinterleme sıcaklığı 1300°C olarak belirlendi. Elastik modül, sertlik ve kırılma tokluğu değerleri de 1300°C'de yapılan sinterleme sonucunda %2 3Y-TZP katkılı sermette sırasıyla 307 GPa, 10.5 GPa ve 12.1 MPa.√m olarak belirlenmiştir.

## Characterization and Mechanical Properties of Tetragonal Zirconia Reinforced $Cr_3C_2$ -Ni(Cr) Cermet Composites

### Abstract

#### Key words

3Y-TZP  
SEM  
Organo-Steric  
Entrapment  
Sintering  
Fracture

Cermets are widely used in cutting tool industry. Commercial brands are also usable under different patents. In this study, the effect of 3Y-TZP reinforcements on the sintering behaviors and mechanical properties of  $Cr_3C_2$ -Ni(Cr) cermets were investigated. Sintering kinetics were studied by sintering at three different temperatures and formed phases were evaluated by XRD and SEM analysis. To investigate the effect of reinforcement on the mechanical properties, the elastic modulus, hardness and fracture toughness experiments were carried out. 1300°C was found as sintering temperature from sintering kinetic studies. Elastic modulus, hardness and fracture toughness values were found as 307 GPa, 10.5 GPa and 12.1 MPa.√m, respectively.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Bir sermet, seramik (ser) ve metal (met) malzemelerden oluşmuş bir kompozit malzemedir. Genellikle bir seramiğin yüksek sıcaklık direnci, sertlik gibi özellikleriyle bir metalin plastik olarak deforme edilebilme özelliklerinin optimal bir birleşimi şeklinde dizayn edilirler. Malzemenin fiziksel yapısına ve istenilen özelliklere göre sermetler aynı zamanda metal matris kompozitler de olabilir, fakat sermetlerin genellikle metal hacim oranı %20'yi geçmez (Zhang 1993; PASTOR 2007).

Tungsten karbür kobalt bağlayıcı fazla sinterlenerek en yaygın kullanılan sermettir. WC-Co'nun en önemli dezavantajı yüksek kesme hızlarından kaynaklanan

yüksek sıcaklıklarda (600°C civarında) Co'nun oksitlenmesi ve WC'nin bozunması ile WC-Co bütünlüğünün bozulmasını takiben ani kırılma ile aşındırıcı ucun işlevini kaybetmesidir (Tracey 1992). Yüksek sıcaklık korozyon direnci Co'dan daha yüksek olan Ni veya alaşımlarının kullanımı ise WC'nin ıslatma özellikleri açısından sorun teşkil etmektedir. Bununla beraber geleneksel yöntemlerle WC'nin Co ile birlikte bile görece yüksek sıcaklıklarda (1500-1600°C) sinterlenebiliyor olması da yüksek enerji tüketimiyle mühendislik olarak uygun olmamaktadır (Tracey 1992; Upadhyaya 2001). Bu durum araştırmacıları daha düşük sıcaklıkta sinterlenebilen ve sertlik-mukavemet-kırılma tokluğu-aşınma direnci

değerleri WC-Co'ya görece olarak benzer olan başka malzemeleri araştırmaya yöneltmiştir.

WC-Co'a tane inceltici olarak ilave edilen Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> de yüksek ergime noktası sahip, yüksek sıcaklık korozyon direnci olan, sert, yüksek mukavemetli ve Ni metali ve/veya Ni(Cr) alaşımı ile ıslatma açısı çok düşük olan bir refrakter karbürdür.

Yapılan çalışmalarda geleneksel yöntemlerle toz metalürjisinden üretimde sinterleme sıcaklığı 1300-1400°C civarında bulunan Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni(Cr) sermetlerinin sertlik-mukavemet-kırılma tokluğu-aşınma direnci değerleri WC-Co'ın biraz altında kalmasına rağmen ekonomik üretilebilirlik açısından önem arz etmektedir (Tracey 1992; C-D. QIN 1993; Upadhyaya 2001). Krom karbür, bir metalin yüzeyine kaplandığında, yüzeye hem aşınma hem de korozyon direnci verir ve bu özelliğini yüksek sıcaklıklarda da sürdürür. Bu tip kaplama uygulamaları için en sert ve genelde en çok kullanılan kompozisyonu Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>'dir (Lide 1998).

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılacak olan ticari Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Ni, Cr tozları Atlantik Mühendislik Ltd.Şti, NJ, ABD'den satın alınmıştır. Tozların ortalama boyutları, Malvern Hydro 2000 cihazında lazer parçacık boyut analizi ile sulu olarak belirlenmiş ve Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Ni, Cr için sırasıyla 4,5 µm, 8 µm ve 4 µm olarak bulunmuştur.

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozuna yapılan parçacık boyut analizinde d<sub>10</sub>=2 µm, d<sub>50</sub>=4,5 µm ve d<sub>90</sub>=11 µm bulunmuştur. Toz içindeki daha büyük parçacıkları da uygun boyuta getirmek ve daha homojen toz boyut aralığına ulaşarak, teknik seramiklerin başlangıç toz boyutu olan 1-2 µm arası boyuta indirmek için Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozuna kuru değirmenleme uygulanmıştır. 2 saatlik değirmenleme sonucunda ortalama toz boyutunun d<sub>10</sub>=1,3 µm, d<sub>50</sub>=1,7 µm ve d<sub>90</sub>=2,3 µm olacak şekilde indiği görülmüştür.

Katkı malzemesi olarak kullanılacak toz ise, tetragonal ZrO<sub>2</sub> idi. Gülgün ve Kriven tarafından bulunup uygulanan ve polimerle sterik yakalama olarak adlandırılan metotla laboratuvarlarımızda sentezlenmiş ve kullanılmıştır (Lee and Kriven 1998; Kriven, Rosczyk et al. 2003). Bu metot hemen

hemen tüm oksit ve karışık oksit tozların sentezi yapılabilecek şekilde kullanılmaktadır (Gulgun, Nguyen et al. 1999; Nguyen, Lee et al. 1999).

Yapılan TG/DTA analizleri ile kalsinasyon-polimer uzaklaştırma deneyleri sonucu elde edilen X ışınları deseni verilerinin de ışığında, her iki faz için polimerin tamamen uzaklaştırıldığı, ağırlık kaybının olmadığı, kristallerin tam olarak belirgin hale geldiği, piklerde herhangi bir kamburluk gözlenmeyen, sıcaklık 1000°C olarak belirlenmiştir. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada, her iki kristal yapı için de 1000°C'de kalsine edilen ve ortalama 40 nm birincil kristal boyutuna sahip tozlar kullanılmıştır. Katkı olarak kullanılacak nano tetragonal ve kübik tozların üretimi ve karakterizasyonundan sonra ana kompozisyona eklenmesinde geleneksel toz metalürjisi ile üretim yöntemi uygulanmıştır.

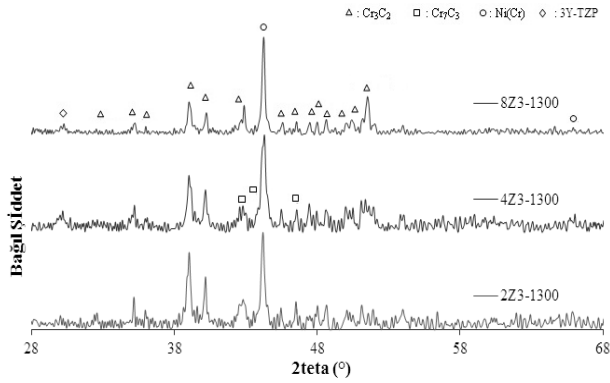
Sinterlenen sermet numunelerin yüzeyleri 9 mikron altına parlatılıp faz analizleri XRD ile yapılmıştır. Yüzeyleri 1 mikron altına parlatılıp ayna görünümü kazanan numunelerin yüzey morfolojileri SEM-BEC ile belirlenmiştir. Yoğunlukların belirlenmesinde Arşimet metodu kullanılmıştır. Mekanik özellik ölçümleri için dinamik elastik modül (GrindoSonic Mk5), Vickers mikro sertlik (Instron Wolpert Testor 2100) ve tek kenardan çentikli kırılma tokluğu (Instron 5569 Universal Test Cihazı) testleri seçilmiş ve uygulanmıştır. Tek kenardan çentikli kırılma tokluğu için destek mesafesi 20 mm olarak belirlenmiş, çentik açıklığı yüksekliğin %30-%40'ı arasında tutulmuştur. Dinamik elastik modül için ASTM E1876 standardından yararlanılmıştır. Kırılma tokluğu deneyleri Mecholsky (2007)'nin önerdiği formülle hesaplanmıştır (Mecholsky 1993).

$$K_{IC} = \frac{3.F.l.\sqrt{a}}{2.b.h^2} (1.93 - 3.07q + 14.53q^2 - 25.11q^3 + 25.80q^4)$$

Burada; F, uygulanan yükü (N), l, destekler arası mesafeyi (mm), b, numune genişliğini, h, numune yüksekliğini a, mm cinsinden kenardan açılan çentik yüksekliğini; q ise a/h yani çentik yüksekliğinin numune yüksekliğine oranını belirten, K<sub>1c</sub>'yi kalınlıktan bağımsız hale getiren birimsiz bir parametreyi temsil etmektedir.

### 3. Bulgular

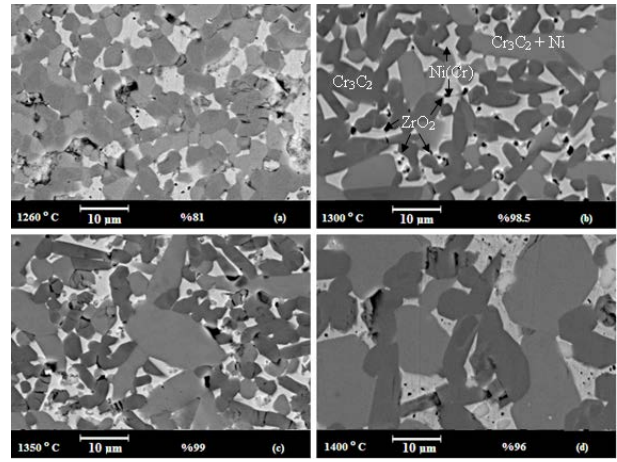
Şekil 1'de üç farklı katkı oranındaki sermetlerin  $1300^\circ C$ 'de sinterlenmesinden elde edilen XRD deseni görülmektedir.



**Şekil 1.** Farklı katkı oranlarına sahip sermetlerin  $1300^\circ C$ 'de sinterlenmesinden elde edilmiş XRD deseni

Şekil 1'de ise  $1300^\circ C$ 'de sinterlenmiş-yoğunlaşmış ve ağırlıkça %2, %4 ve %8 3Y-TZP içeren sermetlerin XRD desenlerinin bir karşılaştırması görülmektedir. Artan  $ZrO_2$  oranı ile yapıda oksit faz miktarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bununla beraber  $Cr_3C_2$  piklerinin şiddetleri de  $Cr_7C_3$  piklerinin benzer açılarda olmalarından böylece üst üste çakışmış olmasından dolayı düşmüş fakat genişlemiştir. Artan  $Cr_7C_3$  miktarı ile Ni'nin oda sıcaklığında dahi bu fazda ağırlıkça %6 çözünürlüğü bulunduğundan, sistemdeki göreceli miktarında bir düşüş olmuş ve Ni'nin ikincil piklerinin şiddetinde azalma ( $51,8^\circ (2\theta)$ ) görülmüştür.

Şekil 2a'da  $1260^\circ C$ 'de 30 dak süre ile sinterlenmiş numunenin SEM yüzey fotoğrafı görülmektedir. Metal bağlayıcı fazın,  $ZrO_2$  ile yaptığı ötektik sonucu ergimesi ve/veya viskozitesinin düşmesi ile tane aralarında bağlayıcı olarak davrandığı görülmektedir. Çözünme-yeniden çökme mekanizması ile sıvı fazdan büyüyen taneler bulunmakta fakat tanelerin birbirlerine değerek (faceted) büyüdüğü bölgelerde metal fazın üç boyutlu ağ yapısının henüz kurulamadığı ve boşlukları dolduramadığı görülmektedir.



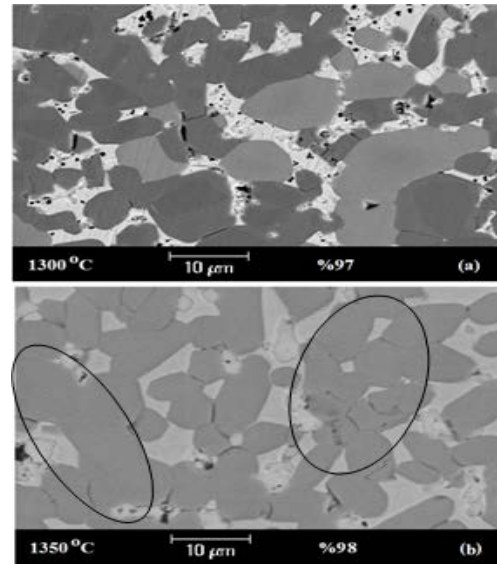
**Şekil 2.** %2 3Y-TZP katkılı sermetlerin a)  $1260^\circ C$ , b)  $1300^\circ C$ , c)  $1350^\circ C$ , d)  $1400^\circ C$ 'de sinterlenmesinden elde edilen numunelerin geri saçınımlı elektronlarla inceleme modunda SEM görüntüleri.

Sıcaklığın artmasıyla metal bağlayıcı faz eriyip viskozitesinin aniden düştüğü, sinterleme için itici güç olan tane sınırını azaltma eğilimiyle, malzemede hızlı bir yoğunlaşma gözlemlenmektedir. Bu sıcaklıkta sinterlenen numunelerde ortalama göreceli yoğunluk  $98,5 \pm 0,5$  değerindedir. Sıvı fazın sinterlemeye bu kadar hızlı katkı sağlaması ile bazı taneler sıvı faz içinde, katkı yapılan zirkonyanın da tane büyümesini engelleyici etkisiyle, izole halde kalmış ve ortalama tane boyutunun artmasına engel olmuştur. Zirkonya parçacıkları bu aşamada çok büyümemiş ve küçük taneli karbür yapısının oluşumunda önemli rol oynamışlardır. Karbür taneleri anizotropik büyüme eğiliminde olduklarından ve sıvı fazda rahat hareket edebildiklerinden, başka bir tane ile karşılaştıklarında uygun şekilde bir araya gelerek daha da büyük/anizotropik taneler oluşturabilirler.

Gözenekler daha çok  $ZrO_2$ 'nin yoğun olduğu bölgelerde görülmüş, bunun sebebinin de  $ZrO_2$ 'nin sinterlenme-yoğunlaşma esnasında ve soğuma sırasında nikel ve karbür fazdan daha çok çekerek etrafında boşluk bırakması olduğu düşünülmektedir. Zirkonya öbekleri şeklinde kümelenen zirkonya nano tozlar, kendi içlerinde sinterlenerek bazı bölgelerde nikel bağlayıcı fazdan bazı bölgelerde ise tane sınırında öbeklendiği karbür fazdan ayrılma şeklinde gözenek oluşumuna sebep olmuşlardır.

Şekil 2.c'de  $1350^{\circ}C$ 'de viskozitenin daha da düşmesi ile sıvı bağlayıcı faz sayesinde, kapiler etki ile boşluklar doldurulup gözeneklerin elimine edilmesine devam edilmiştir. Yoğunluk bu aşamada teorik yoğunluğa çok yakın hesaplanmıştır, fakat ölçümde kapalı gözenekler hesaba katılmadığı için %0,5 lik bir yanılma payı vardır. Bu sıcaklıkta göreceli yoğunlukların %99 seviyesinde olduğu hesaplanmıştır. Sıvı fazdan büyüyen karbür taneleri, birbirilerine daha çok temas ederek daha büyük tane sınırı alanları oluşturmuş, tane sınırı alanlarının azalması ile sinterlemenin itici gücü de azalmaya başlamıştır. Şekil 2d'de görülen  $1400^{\circ}C$ 'de sinterlemede ise SEM-EDS analizlerinde de belirlendiği üzere saf  $Cr_3C_2$ 'yi temsil eden koyu gri fazların ve  $Cr_3C_2+Ni$  fazını temsil eden açık gri fazların aşırı büyüdüğü görülmüştür. Zirkonya tozların da tane aralarında ve beyaz renkteki metal faz içerisinde aglomere olduğu ve kendi içinde sinterlenerek büyüdüğü tespit edilmiştir.

Şekil 3'den görüldüğü üzere  $1300^{\circ}C$ 'de karbür tanelerin boyutlarının ve narinlik oranlarının  $1350^{\circ}C$ 'de sinterlenmiş numuneye göre küçük olduğu görülmektedir. Bununla beraber ağırlıkça %8 oranında 3Y-TZP topraklarının boyutlarının da  $1300^{\circ}C$ 'de daha küçük ve dağılımının daha homojen olduğu söylenebilir. Artan sıcaklıkla tane boyutu ve narinlik oranında artış görülmüştür. Bunun sebebinin de 3Y-TZP tanelerinin kendi içlerinde yoğunlaşmaları ve sıvı fazda daha hızlı taşınabilmelerinden dolayı boyutlarında artışla birlikte artık dağılımın homojen olmadığı düşünülmektedir. 3Y-TZP'nin homojen dağılımı  $1300^{\circ}C$ 'de görüldüğü üzere, karbür fazın büyümesini engelleyici görev yapmaktadır. 3Y-TZP tanelerinin birleşip yoğunlaşması ile Şekil 3b'de karbür tanelerinin aralarında yer alan, metal faz ve seramik fazdan farklı kontrasta sahip 3Y-TZP partikülleri, 2-3  $\mu m$  boyut aralığına ulaşmıştır. Bu durum katkı tozunun, karbür tanelerinin büyümesini engelleyici rolünün azaldığını göstermektedir.



Şekil 3. %8 3Y-TZP katkılı sermetlerin a)  $1300^{\circ}C$ , b)  $1350^{\circ}C$ 'de sinterlenmesinden elde edilen numunelerin geri saçınımlı elektronlarla inceleme modunda SEM görüntüleri.

Nitekim aşırı büyümeyi tetikleyen yüksek sıcaklık ve sıvı faz ile gerek kendinden küçük komşu taneleri kendilerine katarak (harcayarak) gerekse artan 3Y-TZP miktarı ile sıvı fazın Cr-C ve Zr-O çözünlülüğünün değişmesinden dolayı yapıda tek faz şeklinde görülen olası  $Cr_7C_3$  fazları aşırı büyüme (abnormal grain growth) eğilimindedir.

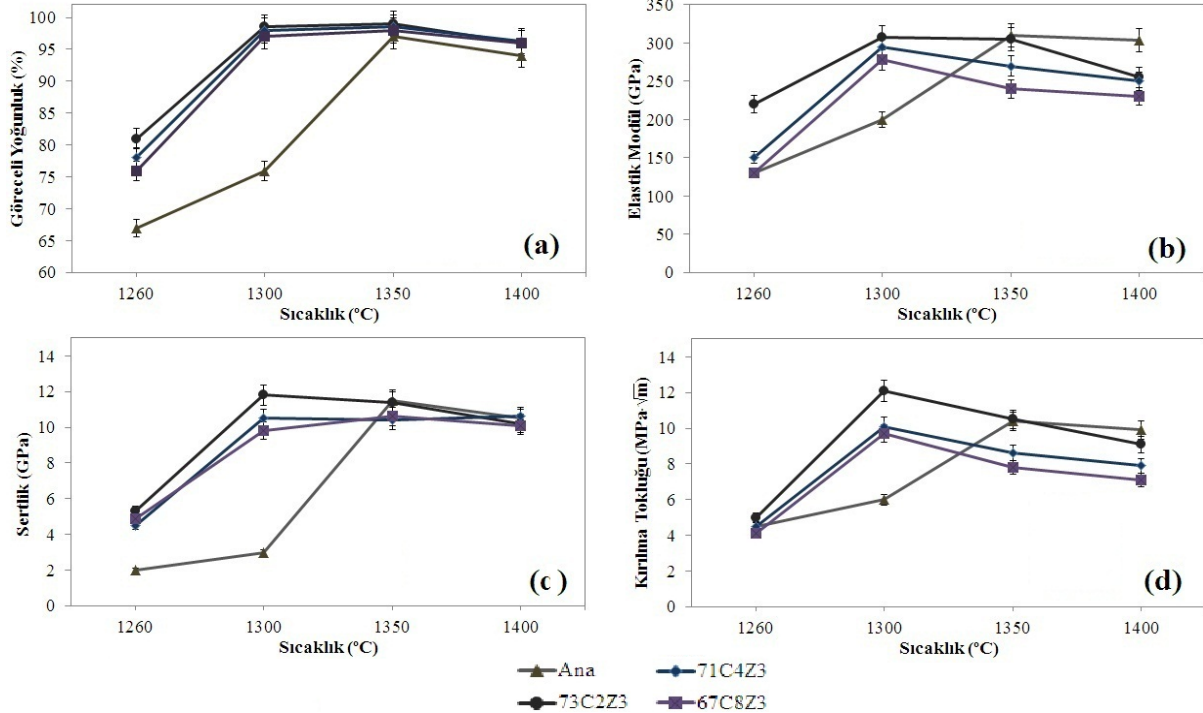
Farklı katkı oranında XRD'de de belirtildiği gibi yüksek 3Y-TZP oranlarında ve yüksek sıcaklıkta yapılan sinterlemeler sonucunda da 67C8Z3 katkılı sermet kompozisyonunda %8,9 civarında 3Y-TZP görüldüğü ve sistemde oda sıcaklığında da çözünmeden kaldığı görülmüş ve  $1350^{\circ}C$ 'den elde edilen numunelerin SEM görüntülerine hacimsel sayım yapılarak belirlenmiştir ve Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre hesaplanmış hacimsel yüzde oranları ile ölçülmüş hacimsel yüzde oranları benzerlik göstermekte, bu da zirkonyanın yapıdaki varlığını herhangi bir reaksiyon vermeden devam ettirdiğini göstermektedir.

Tablo 1.  $1350^{\circ}C$ 'de sinterlenmiş 3Y-TZP katkılı sermetlere SEM-BEC görüntülerinden küçük kareler metodu ile yapılan hacimsel % oran sayım sonuçları.

| Numune Kodu | Hesaplanmış hacimsel % 3Y-TZP | Ölçülmüş hacimsel % 3Y-TZP |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| 73C2Z3      | 2,39                          | 2,06                       |
| 71C4Z3      | 4,76                          | 5,35                       |
| 67C8Z3      | 9,46                          | 8,94                       |



Şekil 4a'da dört farklı kompozisyondan elde edilen göreceli yoğunluk değerleri artan sinterleme sıcaklıklarına göre verilmiştir. Buna göre, katkısız sermette görülen kademeli yoğunlaşma davranışı katkılı sermetlerde görülmeyip, ara aşama hızlı bir şekilde geçilmiş ve 1300°C'de bile %98,5 ±0,5 göreceli yoğunluğa (73C2Z3) ulaşılabilmektedir. Bunun sebebinin, sisteme katkılanan tetragonal zirkonya (3Y-TZP) nano tozlarının nikel bağlayıcı faz ile etkileşerek olası bir düşük sıcaklıkta ergime (ötektik) davranışı göstermiş olmasına inanılmaktadır (Tracey 1992; C-D. QIN 1993).



Şekil 4. 3Y-TZP katkılı sermetlerin a) Göreceli Yoğunluk, b) Elastik Modül, c) Sertlik, d) Kırılma Tokluğu gibi mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı gösterimi.

Şekil 4c'de sertlik değerleri de sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak verilmiştir. 1260°C'de katkısız sermetlerde yoğunlaşma sağlanamadığı için sertlik 2 GPa seviyesinde kalmıştır. 1300°C'de yine 73C2Z3 kodlu sermette tane şekil yerleşmesi ile ani artan göreceli yoğunluk, tanelerin de göreceli olarak küçük kalması ile sertliği 11±0,5 GPa'a yükseltmiştir. 1350°C'de devam eden yoğunlaşma ile %99 ±0.5 göreceli yoğunluklar elde edilmiş ve 73C2Z3 kodlu numunelerde ortalama 11,4±0,5 GPa sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Burada 3Y-TZP'nin yoğunluğa katkı yaparak sistemin devamlılığını bozmayacak miktarda olması asıl önemli parametredir. Çünkü artan katkı oranlarında da

Şekil 4.b'de elastik modül değerlerinde de katkılı sermetler için en yüksek 307 GPa'dan en düşük 255 GPa'a (73C2Z3 için) gerileme görülmüştür. 1400°C'de düşen yoğunluk ve zirkonyanın kendi düşük elastik modülünün (207 GPa) bu düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. XRD'de gözlenen olası faz ayrışması da bu durumu desteklemektedir. 1260°C gibi daha düşük sinterleme sıcaklıklarında göreceli yoğunluk %81 civarında, gözeneklerin bu aşamada silindiriğe yakın formda, atmosfere açık ve büyük boyutlu oldukları düşünülmektedir.

%98±0,5 ve üzeri göreceli yoğunluklar elde edilmesine rağmen sertlik değerleri yine 10±0,5 GPa civarında seyretmiştir.

Şekil 4d'de ise kırılma tokluğu değerleri sinterleme sıcaklıkları ile karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. 1300°C'ye artan sıcaklıkla yoğunluktaki ani artış, tokluk değerlerinde de artış sağlamış ve 73C2Z3 kodlu numunede 1300°C'de ortalama 12,1±0,5 MPa·√m değeri ile 3Y-TZP katkılı sermetler içinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Metal fazın sıvı faza geçerek tüm seramik taneleri çevrelemesi ve üç boyutlu ağ yapısını oluşturması tokluk artışındaki en önemli etkidir. Göreceli yoğunluğun özellikle 73C2Z3 kodlu sermetlerde 1300°C'de %98,5±0,5

seviyesine ani artışı, sıvı fazın daha etkin bir şekilde yapıdaki karbür taneleri izole halde bırakmasına sebep olmuştur.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

3Y-TZP katkılı sermetler 1300°C'de %98 üzeri göreceli yoğunluklara sinterlenebilmiştir. 3Y-TZP'nin yoğunluğu arttırıcı etki gösterdiği 73C2Z3 kodlu sermette en yüksek elastik modül değeri 307 GPa olarak belirlenmiştir. Sertlikte de aynı kompozisyonda 11.4 GPa değerine ulaşmıştır. Artan yoğunlaşma, görece küçük karbür taneleri ve görece küçük zirkonya katkı boyutunun sertlikte ana kompozisyona benzer değerler gözlenmesine neden olduğu düşünülmektedir. Kırılma tokluğu ise yüksek yoğunluğa ulaşmış ve göreceli küçük tane boyutuna sahip şekilde sinterlenmiş 73C2Z3 kodlu numunelerde  $12,1 \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$  ile maksimum değerine ulaşmıştır. Göreceli yüksek yoğunluk ve tane boyutu/narinlik oranı değerlerinin minimumda olmasının yanında tetragonal zirkonyanın olası dönüşüm toklaşmasına uğramış olması ve gerek çatlak yönünü değiştirerek gerekse çatlak ucunu kapatarak tokluğa katkı sağlaması da mümkündür.

#### Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında maddi manevi emeği geçen tüm GYTE ailesine ve 2011-A-025 kodlu projeye, XRD ve SEM analizlerindeki yardımlarından dolayı uzmanlarımız Adem ŞEN ve Ahmet NAZIM'a teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- C-D. QIN, B. D. (1993). "Diffusion bonding of a nickel (chromium) alloy to zirconia: mechanical properties and interface microstructures." *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* **28** 4366-4374.
- Gulgun, M. A., M. H. Nguyen, et al. (1999). "Polymerized organic-inorganic synthesis of mixed oxides." *Journal of the American Ceramic Society* **82**(3): 556-560.
- Kriven, W. M., B. R. Rosczyk, et al. (2003). "Synthesis of mixed conducting oxides by an organic steric entrapment method." *27th International Cocoa Beach Conference on Advanced Ceramics and Composites: A* **24**(3): 287-292.
- Lee, S. J. and W. M. Kriven (1998). "Preparation of ceramic powders by a solution-polymerization route employing PVA solution." *22nd Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: B* **19**(4): 469-476.

- Lide, D. R. (1998). *Handbook of Chemistry and Physics* (87 ed.). Boca Raton, FL, CRC Press.
- Mecholsky, J. J. (1993). "Strength and fracture of glass and ceramics, *Glass Science and Technology*, Vol. 12. By J. Mencik. Elsevier, Amsterdam 1992, 356 pp., hardcover \$ 110.50, ISBN 0-444-98685-5." *Advanced Materials* **5**(3): 224-225.
- Nguyen, M. H., S. J. Lee, et al. (1999). "Synthesis of oxide powders by way of a polymeric steric entrapment precursor route." *Journal of Materials Research* **14**(8): 3417-3426.
- Pastor, H. (2007). Chapter 9: Materials for Cutting, Drilling and Tribology. *Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications*. P. B. J.-C. Niepce, ISTE Ltd.
- Tracey, V. A. (1992). "Nickel in Hardmetals." *Refractory Metals & Hard Materials* **11** 137-149.
- Upadhyaya, G. S. (2001). "Materials science of cemented carbides-an overview." *Materials and Design* **22**: 483-489.
- Zhang, S. (1993). "Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties." *Materials Science and Engineering, A* **163** 141-148.