

Gökhan BAŞMAN (*)
Erdem ATAR (**)
E. Sabri KAYALI (*)
(*) İTÜ Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği Bölümü 80626
Maslak - İSTANBUL
(**) Gebze Yüksek Teknoloji
Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve
Mühendisliği Bölümü, 41400
Gebze - KOCAELİ

Seramik malzemelerin aşınma davranışı

ÖZET

Farklı bileşimlerde ve cam yapıları içeren seramik malzemeler, aşınmanın etkili olduğu uygulamalar için gerekli yüksek sertlik ve korozyon direncine sahiptirler. Bu çalışmada, seramik malzemelerin aşınmasını etkileyen parametreler açıklanmış ve seramik malzemelere uygulanan aşınma deneyleri hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik malzemeler, aşınma davranışı, aşınma deneyleri

1 GİRİŞ

Seramik, farklı bileşimdeki kristal ve cam yapıları içeren ve genellikle poroziteye sahip olan malzemelerdir. İyonik ve kovalent bağ yapısına sahip olan seramik malzemelerin, yüksek sıcaklıktaki mukavemet ve sertlikleri, korozyona karşı dirençleri (özellikle şiddetli korozif ve oksitli atmosferde) ve yorulma dirençleri yüksektir. Bu özellikleri ile seramik malzemeler, aşınmanın etkili olduğu uygulamalarda kullanılan bir malzeme grubunu oluşturmaktadır [1].

Seramikler genel olarak iki sınıfa ayrılırlar:

- Hidratlı alüminasilikatların küçük kristallerini birinci derecede içeren pişmiş killer,
- Maliyeti yüksek ileri teknoloji ürünü saf yoğun oksitler, nitrürler, karbürler ve borürler.

İleri teknoloji ürünü seramikler, özellikle 20. yüzyılın sonlarına doğru geliştirilmiştir. Geleneksel seramiklerden hammadde, üretim yöntemleri ve mikroyapısal açılarından farklılıklar gösterirler. Çok ince tozlardan üretilen bu seramikler üstün mekanik özelliklere sahiptirler. İleri teknoloji ürünü seramik malzemelerinin aşınma davranışları incelendiğinde, ortam şartları (örneğin korozif aşınma) gibi mekanik etkilerle de aşındıkları anlaşılmıştır (2).

Seramiklerde aşınma mekanizması; büyük çoğunlukla seramik bünyedeki tek tanelerin mekanik ve/veya kimyasal zorlamaların etkisiyle bünyeden ayrılması şeklindedir. Diğer bazı seramiklerde ise aşınma; bir taneden veya yüzeyden mikropartiküllerin kopması sonucu olmaktadır. Kopan bu mikro partiküller bir taneden daha küçük ve mikron altı boyutta olabilmektedir (2).

İleri teknoloji ürünü seramik malzeme olarak çok kullanılan alümina, uygulamalarda yüzeyden tane kopması şeklinde aşınma davranışı gösterir. Bu durum, farklı yönlerdeki kristallerin termal genişmelerinde anizotropik özellikler göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu anizotropik özellikler tane sıraları boyunca çatlak oluşumlarına neden olduklarından, kab taneli yapılarda daha etkilidirler. Büyük taneli yapılarda mikro çatlaklar tane içlerine doğru gelişme göstermektedirler (2).

Bu aşınma davranışının iki önemli sonucu vardır:

- İlk olarak yüzeyde boşluklar oluşur. Bu, boşluklara en yakın partikülün yüksek açılı aşınmasına neden olur. Çarpma aşınma testleri, çarpma açısının 60°'nin üzerinde olması, daha hızlı aşınmanın oluşacağını göstermektedir.
- Aşınmada daha sonra, yüzeyden kopan partiküller aşındırıcı partiküller halini alır. Bu partiküller genellikle keskin köşeli, yüzeydeki taneler kadar büyük ve serttirler. Bu partiküller, seramik yüzeyini başlangıç aşındırıcı partiküllerden çok daha etkili bir şekilde aşındırırlar.

SiN gibi oksit olmayan seramiklerin aşınma davranışı oksitli seramiklere benzemektedir. Bu tip seramiklerin sürtünme ve aşınma davranışı, hem adhesiv hem de abrazif koşullarda anizotropiktir. Seramik yüzeyi üzerinde bulunan adsorbanlar aşınmada önemli rol oynamaktadır. Sıcaklığın artışıyla adsorbanlar, sürtünmeyi

azaltmaktadır. Hatta, yüksek sıcaklıklardaki sürtünmede, yüzeyler grafitlenerek, sürtünme hızlı bir şekilde azalmaktadır [2].

2 SERAMİK MALZEMELERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ

Seramik malzemeler gevrek yapıdadırlar. Talaş kalkması ile aşınabilirler. Keramik malzemelerin yüzeylerinde ve yüzeylerin altında çatlaklar oluşur. Daha sonra oluşan bu çatlaklar birleşerek seramik malzemelerde küçük talaşlar ortaya çıkarır [2].

Seramik malzemeler, yüksek basma ve çekme gerilmelerine duyarlıdırlar. Metal ve polimer malzemeler, kırılma meydana gelmeden önce basma gerilmeleri karşısında plastik deformasyon gösterirler. Oysa seramik malzemelerin plastik deformasyon gösterebilmesinin tek bir koşulu vardır. Bu koşul, seramik malzemelerin hidrostatik gerilmelerle plastik deformasyon gösterebilmesidir. Ancak bu plastik deformasyon, metaller ve polimerler ile kıyaslandığında oldukça küçüktür [2].

Bir seramik malzemenin sıcaklığını, ergime sıcaklığının 0,6 katına yükseltmekle dislokasyonların hareketliliği ile plastik deformasyon potansiyeli arttırılır. Mukavemette meydana gelen azalmayla birlikte yüksek sürtünme hızları, sıcaklığın yükselmesine eşlik eder. Ancak seramik malzemelerde sıcaklıktaki artışla birlikte plastisitedeki artış metallerde sık görülen sünekliğe sebep olmaz. Seramikler gevrek yada yarı gevrek bir davranış gösterirler [2].

Gevrek malzemelerde kayma teması olduğu zaman deformasyon türü aşınmaya neden olur. Abrazif aşınma ve erozyon durumunda ise aşınma problemlidir [2].

Seramiklerde, düşük ısı iletkenlik nedeniyle, sürtünme sırasında oluşan ısı, büyük ısı eğimleri ve dolayısıyla sıcak noktalar oluşturabilir. Eğer seramik malzemeler hızlı şekilde soğutulurlarsa, bu sıcak noktalar büyük oranda çekme gerilmesi oluşturur ve bunun sonucunda çatlaklar oluşabilir. Sonuç olarak yüzeyden büyük parçaların kopması ve aşınmada artış söz konusu olur [2].

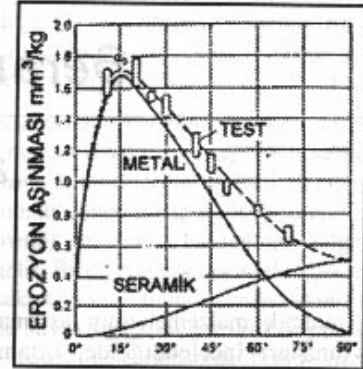
Seramikler, deformasyon hızına karşı oldukça duyarlıdır. Bu nedenle artan kayma hızıyla ve buna ilaveten sürtünme ısınması ile birlikte çatlak oluşma olasılığı artmaktadır. Bu duyarlılık; darbeye ve erozif aşınmaya karşı seramik malzemelerin kullanılmasını gündemden düşürmektedir [2].

Katı partikül erozyonunda, partikül çarpma açısı malzemenin kopma hızını etkilemektedir. Metal malzemeler için maksimum erozif aşınma, 20°C 40° arası partikül çarpma açıları arasında oluşur. Keramik malzemelerde ise bu açı 90°'ye yaklaştığı zaman erozyon aşınma hızı artar. Şekil 1 seramikler ve metaller için partikül çarpma açısına karşılık erozyon aşınma hızının değişimini vermektedir [2].

Seramik ve aşındırıcı ortamın bağıl sertliği de erozyon mekanizmaları için önemlidir. Aşındırıcı ister yumuşak, ister seramik kadar sert olsun, aşındırıcının sertliğindeki küçük bir artış, erozyon aşınmasında büyük artışlara neden olmaktadır [2].

Aşındırıcı, seramikten çok daha sert olduğu durumlarda, erozyon hızında mikroyapı ve kırılma tokluğu önemli hale gelmektedir. Böyle durumlarda, erozyon hızı tane boyutunun küçültülmesi ve porozitenin azaltılması ile minimize edilebilir [2].

Aşınmanın etkili olduğu uygulamalarda oldukça çok kullanılan ticari seramik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Seramik ve metal malzemelerin erozyon aşınması üzerine partikül çarpma açısının etkisi [2]

Özellikler	Al ₂ O ₃	SiC	Si ₃ N ₄	PZS	Sialon	TiC	WC/Co	Pyrex
Yoğunluk (g/cm ³)	3,9	3,1	3,3	5,8	3,2	4,9	3	2,5
Sertlik, HV (kg/mm ²)	1500	2700	1300	1600	1780	3000	1500	-
Elastisite Modülü, GPa	370	410	276	200	290	430	552	70
Çekme Mukavemeti, MPa	262	100	524	700	450	896	896	-
Basma Mukavemeti, MPa	2600	-	-	1850	3500	-	-	-
Eğme Mukavemeti, MPa	380	550	660	690	-	250	250	69
Kırılma tokluğu, MPa(m) ^{1/2}	-	4,6	4,5	9,5	7,7	-	-	-
Poisson oranı	0,26	0,19	0,24	0,23	-	0,19	-	0,2
Ergime Noktası, °C	2015	2700	1900	2700	-	-	-	-

3 SERAMİK MALZEMELERDE AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Seramik malzemelerde aşınmayı etkileyen temel faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir [1,2]:

a) Sertlik: Aşınma ve aşınma uygulamalarında sertlik kritik bir özelliktir. Seramik malzemelerin özelliklerinden biri de iyi bir sertliğe sahip olmalarıdır. Çok sert bir malzemede aşınma hızı oldukça düşüktür. Seramiklerin yüksek elastisite modülüne sahip olmaları ve aynı zamanda plastik deformasyon göstermemeleri nedeniyle, yüklemelerle ve keskin partiküller ile yüzeye etki yapılması durumunda bölgesel olarak gerilme yoğunlaşması meydana gelmektedir. Bu gerilmeler çekme gerilmesi şeklinde olursa, çok hızlı bir şekilde çatlak / mikro çatlak oluşumuna neden olurlar. Seramik bünyede oluşan mikro çatlaklar, malzemenin aşınma direncini düşürdüğünden, aşınmayı ve aşınma hızını artırıcı yönde etki eder.

b) Termal iletkenlik: Bir çok seramik malzemenin termal iletkenliği metallere göre daha düşüktür. Sürtünmenin ve/veya kaymanın etkili olduğu uygulamalarda, lokalize ısı birikimleri meydana gelmekte, bu da malzemelerin yüzeyleri arasında sıcaklık farkları oluşturmaktadır. Sürtünmeden dolayı bu sıcaklık farkları artarsa, oluşan bölgesel gerilmeler ve termal şok, mikro çatlakların meydana gelmesine yol açar. Bu mikro çatlaklar da, bilindiği gibi, aşınma ve aşınma hızını artırır.

c) Kırılma Tokluğu: Seramik malzemelerin kırılma tokluğu, metallere ve mühendislik plastikleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyelerdedir. İleri teknoloji seramik malzemelerin, kırılma tokluğu 112 MPa arasında değişirken, seramikseramik kompozitlerin kırılma tokluğu 20 MPa'a kadar çıkmaktadır. Seramik malzemelerin kırılma tokluğunun kısmen iyileştirilmesi amacıyla yapılan düzenlemelerde, seramiklerin aşınma direncinde bir miktar düşme olmuş, buna karşılık mikro çatlak oluşumu bariz şekilde engellenmiştir. Burada, bölgesel yüklemeler, termal şok ve gerilmeler karşısında çatlak oluşumuna karşı direnç sertlikteki azalmayla dengelenmektedir.

d) Korozyon direnci: Seramiklerde korozyon direnci sertlik kadar önemlidir. Çünkü, gerçek dünyada daima koroziv bir ortam mevcuttur. Korozyon, seramik yüzeylerde yavaş olarak çatlak büyümesine ve mikro çatlak oluşumuna neden olur. Bu da aşınma hızını artırıcı etki yaratır.

e) Birleştirme / Birleşme Yöntemleri: Seramiklerde, diğer malzemelerle (metal veya plastik) konstrüksiyon yapımı için birleştirilmeleri esnasında oluşan basma ve çekme gerilmeleri önemlidir. Basma gerilmelerinde çok önemli bir aşınma söz konusu olmazken, birleşme yerlerinde oluşabilecek çekme gerilmeleri yavaş olarak çatlak büyütmesini ve sonunda erozyon yoluyla aşınmayı meydana getirir. Ayrıca birleşme bölgelerinde oluşabilecek küçük salınımlı mekanik hareketler de malzemenin aşınmasında etkili olmaktadır.

f) Porozite: Seramik malzemelerde bulunan poroziteler de aşınmada negatif bir etkiye sahiptir. Çekme yüklemelerinde porozite yüzünden çatlak oluşur ve hızlı bir şekilde ilerler. Basma yüklemelerinde de hasar oluşumu uzun sürede meydana gelmektedir. Yüklemelerin yanında porların bulunduğu yerler de aşınma için önemli faktördür. Ayrıca porun boyutu da başka bir kritik faktördür. Taneden daha büyük porlar çatlama önemli bir etkiye sahiptirler. Eğer porlar yüzeye yakın ise bu porlar yüzeyin delinmesine neden olurlar.

4 SERAMİK MALZEMELERİN AŞINMASINDA TRİBOKİMYASAL YETİLER

Seramik malzemeler üzerinde, tribokimyasal ortamın etkisi (oda sıcaklıklarında bile) araştırılmadan önce, seramiklerde, korozyon direnci ve inert kimyasal özellikler en önemli özellikler olarak bilinmekteydi [4].

Seramik malzemelerden SiN'in aşınma mekanizması ile ilgili yapılan sistematik araştırmalar, seramiklerin aşınma miktarının ve aşınma mekanizmasının tribokimyasal reaksiyonlar tarafından belirlendiğini ortaya çıkarmıştır [4].

SiN seramik malzemelerle yapılan çalışmalarda, ortamın bağıl neminin %0'dan %100'e artması ile SiN'in aşınma hızının iki kat azaldığı belirlenmiştir. Argon gazı ortamında yapılan çalışmalarda, kuru argon gazı

ortamında meydana gelen kaymanın, mekanik aşınma ile oluşan mikro çatlaklar sonucunda meydana geldiği saptanmıştır. Nemli argon gazı ortamında ise aşınma izlerinin pürüzsüz olduğu gözlenmiştir. Ayrıca nemli argon gazı ortamında oluşan aşınma ürünlerinde, birkaç nanometre boyutta disperse olmuş “SiN kristalitleri” adı verilen kristalin fazla beraber, baskın olarak SiO₂ amorf fazı gözlenmiştir [4].

Sulu ortamda meydana gelen kayma sonucu malzeme yüzeyinde ultra seviyede düzgün yüzeyler oluşmaktadır. Oluşan bu yüzeyler, seramik malzemede düşük sürtünme (yaklaşık 0,005 mertebesinde sürtünme katsayısı) ve düşük hızlarda yüksek yüklemeye basıncında bir su filmi oluşturarak hidrodinamik yağlama imkanı vermektedir. Eğer SiN seramik malzemesi ile aşındırıcı malzeme arasında temas ve sürtünme yüksek olursa, seramik malzemenin yüzeyinin paralelligi bozulur. Bu şekilde tribokimyasal etkiler sonucunda bozulan yüzeyler, hidrodinamik yağlama ile kısa zamanda onarılır [4].

Yüksek sıcaklıklarda nemli atmosfer, kayma ve sürtünme kuvvetinin ve aşınmanın azalmasına neden olur. Atmosferik ortamda, 5mmHg ve 700 Pa kadar düşük su buharı basınçlarında SiN seramik malzemesinde kaymada sürtünme katsayısı 0,15'e kadar düşer. Eğer, uygulanan yüklerin ve uygulanan hızın yeterince düşük olduğu durumlarda, kendi kendine yağlama olayı 650°C'e kadar olan sıcaklıklarda görülür. Daha yüksek sıcaklıklarda ise su buharı yüzeyde absorbe almaz. Bu yüzden sıvı yağlayıcıların bulunmadığı yüksek sıcaklıklar, seramik malzemeler için bir yağlama problemine öncülük eder [4].

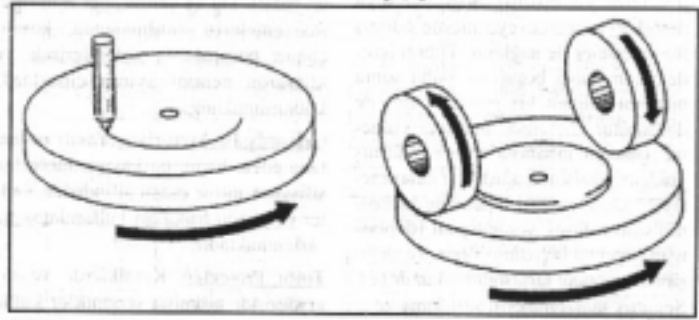
Zirkonyumun kimyası SiN den çok farklıdır. Aynı şekilde zirkonyumun sürtünmesi ve aşınması üzerindeki kimyasal etki de çok farklıdır. Kaymada, nemli atmosferik ve sulu ortam, zirkonyumun aşınma hızında 10 katlık bir artışa sebep olur. Aşınmada meydana gelen bu artışın nedeni kimyasal absorpsiyon gerçekleşmesidir [4].

Suyun absorpsiyonunun oksit seramiklerde kırılmayı hızlandırdığı bilinmektedir. Michalske ve Bunker'in kimyasal absorpsiyon gerçekleşmesi konusunda yaptıkları çalışmalarda, su moleküllerindeki hidrojen atomunun O iyonu üzerine adsorblandığını ve hidroksil radikallerin de metalik iyonlara adsorblandığını belirlemişlerdir. Sonuçta, hidroksil yüzeyler oluşur, gerilmiş bağlar zayıflar ve çatlak hızlanır [4].

5 SERAMİK MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞINI BELİRLEME DENEYLERİ

Seramik malzemelerin kayma aşınması davranışını belirlemede kullanılan bir deney, ASTM tarafından standartlaştırılmış pin on disk (yüzeyden yüklemeli) deneyidir ve ASTM'da verilmektedir. Bu deney düzeneğinde elmas iğne belirli bir yükte dönmekte olan deney örneğinin yüzeyine temas etmektedir. Seramik malzemelerin aşınma deneyi için kullanılan diğer bir düzenek de, serbest olarak dönebilen iki abraziv elmas tekerin dönen deney örneği ile temas halinde olduğu düzenektir. Deney örneği, merkezindeki bir disk tarafından tutulan dairesel bir bileziktir. Bu iki deney düzeneğinin genel prensibi Şekil 2'de gösterilmiştir [3,7].

Seramik malzemeler, sahip oldukları yüksek mukavemetleri, düşük termal iletkenlikleri ve oksidasyona karşı yüksek dirençleri nedeniyle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilen malzeme grubunu oluşturmaktadır. Gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlarda seramik malzemeler, yüksek sıcaklıkta aşınmaya dirençli malzemeler olarak kullanıldıklarından, yüksek sıcaklıktaki aşınma performanslarının belirlenmesi



Şekil 2. Seramik malzemeler için kullanılan aşınma deney düzeneğinin genel prensibininematik gösterilişi [3].

gereklidir. Bu amaçla seramik malzemeler üzerinde orta ve yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 850°C-1500°C) bir çok aşınma ve sürtünme deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyler, atmosfer veya vakum kontrollü atmosferde, 5100 N yük altında, 15 m/sn gibi değişen hızda gerçekleşmektedir. Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyi sistemi Şekil 3'de gösterilmiştir. Sistemde yüksek sıcaklıktan etkilenen bölgeler yüksek saflıkta alumina / silisyum mitrür'den ve paslanmaz çelikten oluşturulmuştur. Elektronik kontrol sistemleri kapalı kutuda gövdenin kenarına monte edilmiştir. Sistem 0,37 kW DC gücündeki motor ile hareket ettirilmekte ve hareket esnek bağlantı elemanlarıyla ve 2:1 redüksiyon dişlisi ile seramik tüpe aktarılmaktadır. Motorun hızı sürekli bir şekilde 0'dan 800 rpm'e kadar değiştirilmektedir. Örnekler ayarlanabilir sütun üzerine yerleştirilmiş fırın ile ısıtılır. Sütun örnek montajına göre ayarlanabilir 2 tip ırın vardır. Birincisi, kantel tel sargı fırını (1200°C'ye kadar ısıtır), ikincisi, SiC elemanlı fırındır (1000-1500°C'ye kadar ısıtılır). Örneğin sıcaklığı termokupl ile ölçülür. Dijital termometre ile de sıcaklık okunur. Fırın sıcaklığı PID aygıtı ile okunur (orantılı integral türevi: ProportionalIntegralDerivative (PID)). Vakumda yapılan deneyler için kapalı alumina tüp, örnek montajı üzerine yerleştirilir. Soğutma suyu destekleyici çerçeveye monte edilmiş flowmetreler ile sağlanır. Tüpün içindeki tüm hava boşaltılır, daha sonra bileşimi bilinen bir gaz karışımı ile doldurulur. Sistemde merkezi yüklemeye çubuğu tabanına monte edilmiş

