



SULU ORTAMDA SİLİSYUM NİTRÜR ÜZERİNDEKİ NANOYAPILI YÜZEYLERİN ÇOK DÜŞÜK SÜRTÜNME ÖZELLİKLERİ

ULTRA LOW-FRICTION CHARACTERISTICS OF NANOSTRUCTURED SURFACES ON SILICON NITRIDE IN AQUEOUS MEDIUM

Yılmaz ÖZMEN^{1*}, Said JAHANMİR²

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye.

yozen@pau.edu.tr

²MiTiHeart Corporation, Maryland, USA.

jahanmirs@verizon.net

Geliş Tarihi/Received: 17.12.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 12.01.2015

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.40469

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Çalışmalar, silisyum nitrürün kendisi ile karşı karşıya çalışması durumunda sulu ortamda sürtünme katsayısının oldukça düşük olduğunu göstermiş olmasına rağmen, böyle düşük bir sürtünme katsayısının oluşumundan etkili olan temel mekanizma hala tartışmalıdır. Bu çalışmada yük ve hız değişkenleri altında sulu ortamda kayan Si₃N₄ - Si₃N₄ çifti için alışma dönemi süresince yüzey pürüzlülüğünün etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, sulu ortamda karışık hidrodinamik yağlama için ve kolloidal silika ile sınır yağlama ile ilgili ortaya konulan mekanizmalar ile tutarlı olmasına rağmen, alternatif bir mekanizma önerilmektedir.

Sürtünme ve aşınma testleri pin-on-disk tribometre kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyler için Rulman kalitesinde silisyum nitrür (NBD-200, Norton Advanced Ceramics), seçilmiştir. Disklerin yüzey pürüzlülüğü çeşitli noktalardan 50x50 µm boyutlarda taranarak bir atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçülmüştür. 5 N ve 120 mm/s'de, honlanmış yüzey üzerinde, sürtünme katsayısı 600 dakika sonra 0.45 den ortalama 0.01 e düştüğü görülmüştür. Bu düşük sürtünme katsayısı, hidrojen-ile-sonlanan oksit filmleri ile kaplanmış iki sert ve elastik olarak deforme temel yüzeyler arasındaki etkileşim ile ilgili olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Silisyum Nitrür, Su ile yağlanma, Sürtünme katsayısı, Seramikler

Abstract

Even though studies have shown unequivocally that the coefficient of friction of self-mated silicon nitride can be quite low in water, the basic phenomena responsible for such a low friction is still controversial. In this investigation the effects of load, speed, and surface roughness on the duration of the run-in period for self-mated silicon nitride in water was studied. Although the results are consistent with proposed mechanisms involving mixed hydrodynamic lubrication by water and boundary lubrication by colloidal silica, an alternate mechanism is suggested. The friction and wear tests were conducted using a pin-on-disk tribometer. The surface roughness of the disks was measured with an atomic force microscope (AFM) scanning several areas 50x50 µm in dimensions. For a test on a lapped surface at 5 N and 120 mm/s, the coefficient of friction is seen to decrease from an average of 0.45–0.01 after 600 min. It is proposed that the low friction could be also related to fundamental interactions between two hard and elastically deforming surfaces covered with hydrogen-terminated oxide films.

Keywords: Silicon Nitride, Lubrication by water, Friction coefficient, Ceramics

1 Giriş

Yüksek teknolojik seramiklerin (oksit ve oksit olmayan) tribolojik davranışları üzerine yapılan araştırmalar göstermektedir ki, seramik su ile reaksiyona girerek çok düşük sürtünme katsayıları vermekte. Bu konunun öncü araştırmacılarından Tomizawa; sulu ortamda rölatif hareket eden seramiklerin hidrodinamik davranış modunda ultra düşük sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğünü sonuç verdiğini belirtmektedir [1]. Seramiklerin tribolojik davranışları ile ilgili laboratuvar ortamındaki araştırmalardan, aşınma olayının iki malzemenin kontak şartlarına bağlı olduğu görülmektedir. Yapısal seramiklerin aşınma başlangıcı her malzemenin kendisine ait eşik yük değerinin aşılmasına müteakip küçük (mikro seviyede) kırılmalar/kopmalar ile olmaktadır. Ayrıca pek çok seramikte karşılaşılan sulu/su buharlı ortamda seramik ile su molekülleri arasındaki yüksek reaksiyon potansiyeli sonucu, seramik yüzeyinde oksitler ve hidroksitler oluşması kaçınılmazdır [2]. Bu reaksiyonlar

aşınma testleri esnasında hızlandığından dolayı tribo-kimyasal reaksiyonlar adını alır.

Bu malzemelerin uygulamada kullanılan yerlerinden bahsedilecek olursa, genellikle ekstrem koşullarda (sıcaklık, basınç, nem vb.) ve bilinen metal ve alaşımların kullanılmasının mümkün olmadığı yerlerde tercih edilebilir. Özellikle savunma sanayiinde kullanılan mezo-ölçekli, hafif, ultra sessiz çalışan ve ekolojik (çevreye zarar vermeyen) buhar türbinlerinde ve yağlamanın sadece su ile yapılabildiği uygulamalarda kullanılması olasıdır.

Literatür araştırmalarında belirtildiği üzere [3]-[6]. Silikon nitrürün aşınması tribo-kimyasal reaksiyon ve reaksiyon ürünlerinin (SiO_x, nH₂O) suda çözünmesi ile gerçekleşmektedir. Bu çalışmalarda sürtünme katsayısının alışma periyodundan sonra 0.03 mertebelerine kadar indiği gözlenmiştir. Bu aşamada birbiri ile çalışan malzeme temas yüzeyleri arasındaki yüzey enerjisi düşmekte ve hidrojen moleküllerinin absorpsiyonu ile bu moleküller arasındaki bağların

pasifleşmesi sonucu sürtünme katsayısındaki düşüş izah edilmektedir.

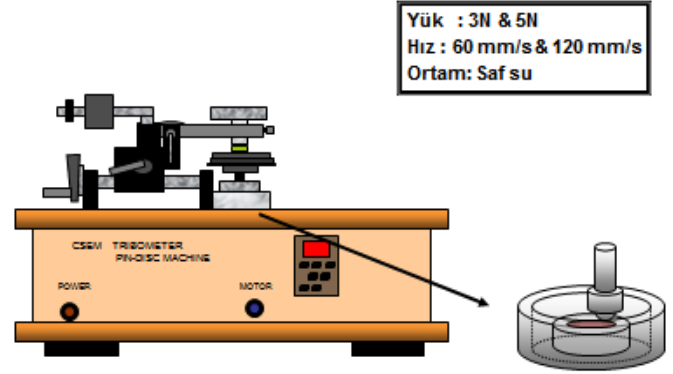
Bu çalışmada NBD 200 Si_3N_4 disk ve bilye çifti malzeme saf su ile yağlanması halinde tribolojik karakteristiklerinin (sürtünme, aşınma, pürüzlülük vb.) nasıl değiştiğini ve zamana bağlı bu parametrelerin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Su ile yağlanmış NBD 200 Si_3N_4 seramik malzemenin ultra düşük sürtünme katsayısı ve aşınma katsayısı gözlenmiş ve özellikle ekstrem koşullarda kullanılabilceği konusunda kanaat oluşmuştur.

2 Materyal ve Metot

Tribolojik deneylerde NBD 200 (Norton Advanced Ceramics) Si_3N_4 disk ve bilye malzemeler kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen genel özellikler Tablo 1'de verilmektedir. Sürtünme ve aşınma deneyleri Pim-Disk deney sisteminde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Kullanılan bilye (pim) 12.7 mm çapında ve diskler ise dış çapı 70 mm'dir. Disk ve bilyelerin yüzey pürüzlülükleri AFM ile ($50 \times 50 \mu m$) ölçülmüştür (Şekil 2 a, b). Bilyeler alındığı gibi: $R_a=2$ nm, Honlanmış disk yüzeyi: $R_a=50$ nm, Tribokimyasal parlatılmış Disk yüzeyi: $R_a=2$ nm, (Parlatma işlemi Traugott Fischer, Stevens Institute of Technology tarafından yapılmıştır) yüzey karakteristiğine sahiptir. Üretilen bu malzemelerin Si_3N_4 (Sinterli ve reaksiyon bağlı, plazma dağlanmış) tipik içyapısı SEM görüntüsü Şekil 3'te görülmektedir.

Deneylerde kullanılan su damıtılmış, de-iyonize edilmiş ve filtre edilmiştir. Deney boyunca numunelerin temas noktaları tam suyun içinde kalacak şekilde dizayn edilmiştir. Deneyler başlamadan önce disk ve bilye numuneler ultrasonik temizleme cihazında etanol ile 5 dakika temizlendikten sonra 1 dakika Aseton içerisinde bekletilmiş ve nihai olarak saf su ile yıkanmıştır. Tribolojik deneyler 3 ve 5 N yükler altında, 60 ve

120 mm/s hızda, toplam 24 saat sürecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu süre içerisinde sırasıyla toplam kayma yolları 5184 m ve 10368 m olmuştur. Tüm deneyler iki defa tekrarlanarak deney süreleri boyunca sürtünme kuvveti kaydedilmiş ve yük ile oranlanarak sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

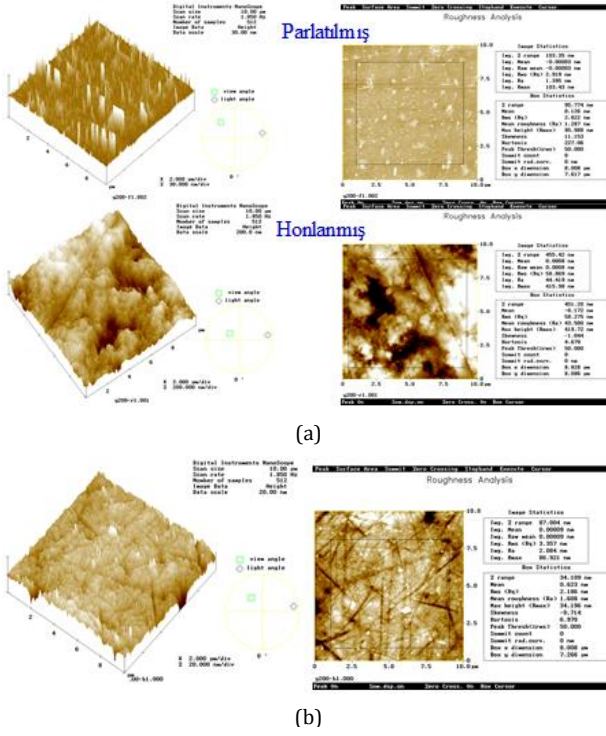


Şekil 1: Pim-Disk deney sistemi.

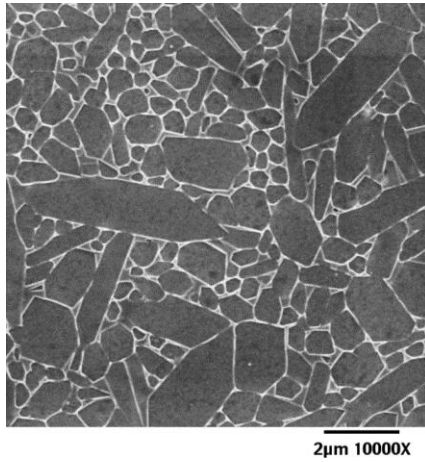
Deneyler sonrasında numuneler değişik karakterizasyon araçları ile karakterize edilmişlerdir. Disk ve bilye üzerinde oluşan aşınma izleri optik mikroskop ve iğneli yüzey profilometrisi ile karakterize edilmiştir. Bilye üzerindeki aşınma izi ölçülere aşınma oranı ($mm^3/N.m$) hesaplanmıştır. Disk yüzeyi üzerindeki aşınma izi de iğneli yüzey profilometrisi ile ölçülmüş ve aşınma hacmi dairesel kesit olarak hesap edilerek aşınma oranı ($mm^3/N.m$) hesaplanmıştır. Daha sonra disk ve bilye numunelerin aşınma bölgeleri sürtünme yönünde ve dik kesit üzerinde AFM karakterizasyonları yapılarak oluşan pürüzlülük ve aşınma yüzey morfolojisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1: Bir tablo örneği.

Özellik	Birim	Test	Değer
Yoğunluk	gm/cc	ASTM-C20	3.16
Kristal boyutu, ort.	Microns	Thin-Section	--
Su absorpsiyonu	%	ASTM-373	0
Gaz geçirgenliği	--	--	0
Esneme dayanımı (MOR), 20° C	MPa (psi x 103)	ASTM-F417	900
Elastisite modülü, 20° C	GPa (psi x 106)	ASTM-C848	320
Poisson oranı, 20° C	--	ASTM-C848	0.26
Basma dayanımı, 20° C	MPa(psi x 103)	ASTM-C773	--
Sertlik	GPa(kg/mm ²)	KNOOP 1000 gm	15
Çekme dayanımı, 25° C	MPa (psi x 103)	ACMA TEST #4	--
Kırılma tokluğu K(I c) (IFR)	Mpa m ^{1/2}	--	6
Termal iletkenlik, 20° C	W/m K	ASTM-C408	29
Termal genleşme katsayısı, 25-1000°C	1 x 10 ⁻⁶ /°C	ASTM-C372	2.9
Özgül ısı, 100° C	J/kg*K	ASTM-E1269	--
Termal şok direnci, Δ Tc	°C	NOTE 3	--
Max kullanma sıcaklığı	°C	NO-LOAD COND.	1,000
Dielektrik dayanımı, 6.35mm	ac-kV/mm (acV/mil)	ASTM-D116	--
Dielektrik Sabiti, 1MHz	25° C	ASTM-D150	8
Dielektrik kaybı (tan delta) 1MHz	25° C	ASTM-D150	--



Şekil 2: Disk ve bilyelerin yüzey pürüzlülükleri AFM (50x50 µm) karakterizasyonu (a) Disk, (b) Bilye.

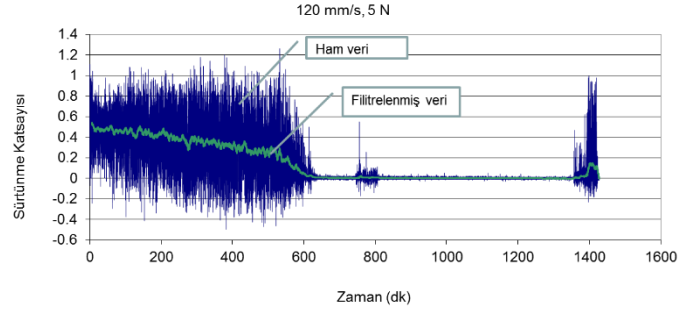


Şekil 3: Si_3N_4 SEM görüntüsü (Sinterli ve reaksiyon bağlı, plazma dağlanmış).

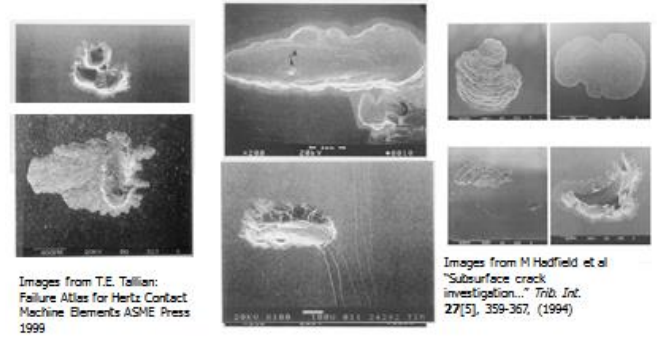
3 Deneysel Sonuçları ve Tartışma

Sürtünme ve aşınma deneyleri esnasında şiddetli durma-kayma (stick-slip) mekanizması meydana gelmiştir. Deneylerde elde edilen tipik sürtünme zaman grafiği Şekil 4'te görülmektedir. Bu durum hemen tüm deneylerde istisnasız söz konusudur. Bu durum numunelerin alması sürecince devam etmekte ve alıştırma sonrasında da farklı konum ve zaman aralıklarında tekrarlamaktadır. Alıştırma sonrası bu olayın meydana gelmesi yüzeyden meydana gelen kopmalar (Şekil 5) ve bunların temas yüzeyinden uzaklaşmasına müteakip tekrar kararlı ultra-düşük sürtünme katsayısı moduna gelmektedir. Bu grafikte görüldüğü üzere sürtünme katsayısı 0.45 ten 0.01 mertebelerine inmektedir. Grafikteki ham veri daha iyi yorumlanıp anlaşılabilmesi için grafik

programı üzerinde filtre edilerek elde edilen (100 hareketli verinin ortalaması) eğri sayesinde deney verileri kıyaslanarak yorumlanabilmektedir.

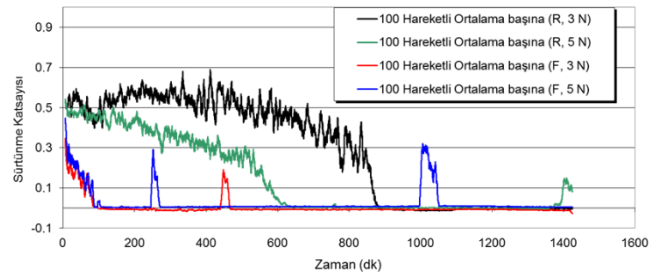


Şekil 4: Sürtünme zaman grafiği. Şiddetli durma kayma (stick-slip) mekanizması. (5 N, 120 mm/s).



Şekil 5: Sürtünme yüzeylerinde meydana gelen kopan Si_3N_4 parçacıklarının morfolojisi.

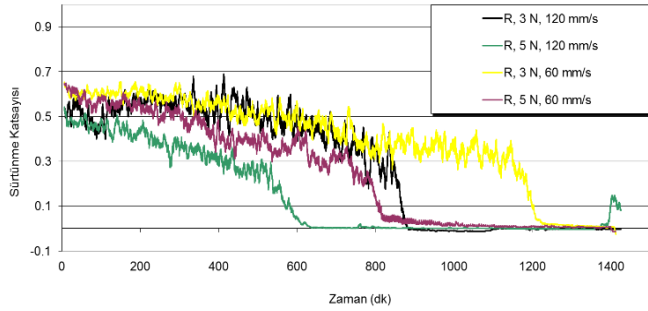
Deneysel parametrelerinin NBD 200 Si_3N_4 disk ve bilye malzemelerin tribolojik karakteristiklerine etkilerine bakıldığında numunelerin alıştırma moduna geçişlerinde farklılık gözle çarpmaktadır. Şekil 6'da 120 mm/s sabit hızda az pürüzlü ve yüksek pürüzlü yüzeylerin farklı yükler altındaki sürtünme katsayıları ve alıştırma rejimine geçiş durumlarını görmektedir. Anlaşılabileceği üzere az pürüzlü yüzeylerde alıştırma moduna yüke bağlı olmadan birbirine çok yakın bir rejimle geçilmektedir. Yüksek pürüzlü yüzeylerde ise 5 N'lik yük altındaki numuneler 3 N'lik yük altındaki numunelere nazaran daha erken alıştırma moduna geçmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere sürtünme mekanizması ve alıştırma moduna geçiş yük miktarı ile farklılaşmaktadır.



Şekil 6: Yüzey pürüzlülüğü ve yükün geçiş değişimine etkisi (120 mm/s).

Diğer taraftan sabit pürüzlülük koşullarında (yüksek pürüzlü) kayma hızı ve yükün alıştırma moduna geçiş etkisine bakıldığında (Şekil 7) Yüksek hız ve yüksek yük altındaki numuneler daha hızlı bir şekilde alıştırma moduna geçmektedirler. Diğer bir deyişle numuneler düşük hız ve yük

altında daha uzun süre sonrasında alıştırma moduna gelebilmektedir.



Şekil 7: Yük ve hızın pürüzlü yüzeydeki geçiş değişimine etkisi

Aşınma izlerinin optik mikroskopla ve çıplak gözle yapılan incelemesinde numuneler üzerinde birkaç mm genişliğinde ve birkaç μm derinliğinde oluştuğu görülmektedir (Şekil 8, 9). Bilye numunelere bakıldığında, aşınma izinin honlanmış (daha pürüzlü) numunelere karşı çalışan bilyelerde, parlatılmış numuneler karşı çalışan bilyelerden 3-5 kat büyüklüğünde meydana geldiği, dolayısı ile pürüzlü yüzeylere karşı çalışan bilyenin daha fazla aşındığını görmekteyiz. Aynı resimlerden pürüzlü yüzeylere karşı çalışan bilyelerin aşınma izinin diğer parametrelere göre (yük, hız) çok az değişkenlik göstermekte iken, parlatılmış numuneler karşı çalışan bilyelerin aşınma izlerinde bariz farklılıklar görülmektedir. Bu durumda yük artarken aşınma izi büyürken hızın artması ile aşınma izi küçülmüştür. Deneyler sonrasında ayrıca temas basınçları uygulanan yük ve ölçülen yüzey alanına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplarda parlatılmış numuneler de 4 MPa civarında iken, pürüzlü yüzeylere sahip numunelerde ise 1 MPa seviyelerinde olmuştur.

Diğer yandan disk numunelerde yapılan incelemede ise (Şekil 9) parlatılmış numunelerin aşınma izleri oldukça belirsiz iken, pürüzlü yüzeylere sahip disk numuneler deneyler sonrasında belirgin bir aşınma izi görülmektedir.

Ancak disk yüzeyleri üzerinde iğneli yüzey profilometrisi ile yapılan karakterizasyonda (Şekil 10) ise parlatılmış numunelerin aşınma izleri daha derin iken, pürüzlü yüzeylere sahip disk numunelerdeki deneyler sonrasında aşınma izleri daha az derin olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere pürüzlü yüzeylere sahip (disk, bilye) numunelerin aşınmaları daha çok pürüzlerden meydana gelirken ve daha yaygın bir kesite yayılırken, parlatılmış numunelerin aşınması ise derinlemesine ve daha küçük bir kesitte meydana gelmektedir. Bu bağlamda parlatılmış numuneler ile pürüzlü numunelerin alışma modu mekanizmaları birbirlerinden farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada gelecek adına bu mekanizma farklılığı üzerinde fazla çalışılmamıştır. Ancak gelecek çalışmalar adına önemli bir ayrıntı olduğunu not etmekte yarar vardır.

Deneylerin akabinde disk ve bilye numuneler AFM ile karakterize edilerek yüzey pürüzlülüğündeki ve morfolojideki değişikliklere de bakılmıştır (Şekil 11). Bilye ve disk anma izleri üzerinde ayrıca SEM analizleri gerçekleştirilmiştir [4]. Bu analizlerden anlaşıldığı üzere aşınma yüzeyleri çizgi çizgi şeklinde plastik deformasyona uğramış ve delaminasyon

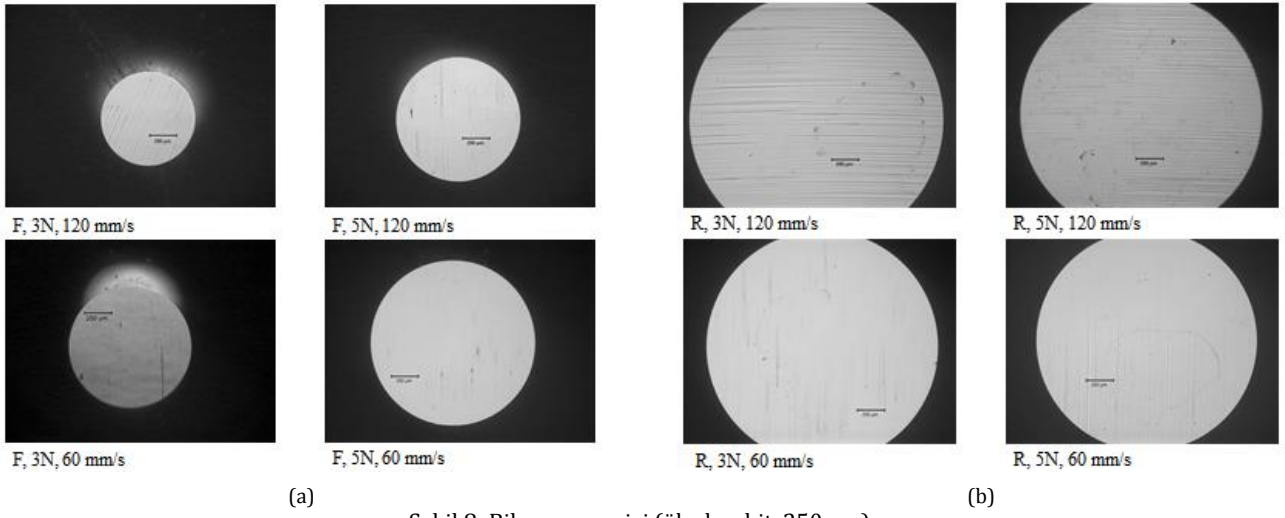
kırılmaları mevcuttur. Bilye üzerindeki aşınma izlerindeki son pürüzlülük değerleri başlangıç pürüzlülüğünden bağımsız olarak 2-8 nm seviyesinde, disk yüzeylerinde ise parlatılmış numunelerde 2-8 nm ve honlanmış disklerde ise 20-40 nm seviyelerinde ölçülmüştür. Belirtmek gerekirse pürüzlülük ölçümü $50 \times 50 \mu\text{m}$ alanda ve bu çizikli aşınma bölgesinin olmadığı kısımlarda yapılmıştır.

Tribolojik deneylere bakıldığında (her koşul 2 şer defa test edilmiştir) tekrarlanabilirliği oldukça iyidir. Genel olarak disk ve bilye numunelerdeki toplam (deney sonrası, 24 saat için) aşınma oranları Şekil 12'de verilmiştir. Geçiş bölgesini esas alarak aşınma oranları (geçiş bölgesi süresi dikkate alınarak) hesaplandığında deneyler, aşınma oranlarının çok büyük bir kısmının alışma aşamasında önce meydana geldiği anlaşılmaktadır (yüksek sürtünme katsayılı rejimden dolayı). Şekilden anlaşılacağı üzere pürüzlü disk numuneye karşı çalışan bilye numunelerin aşınma oranları diğerlerine nispeten daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni ise, pürüzlü yüzeylerin alışma esnasında karşı numuneyi oldukça fazla aşındırdığı söylenebilir.

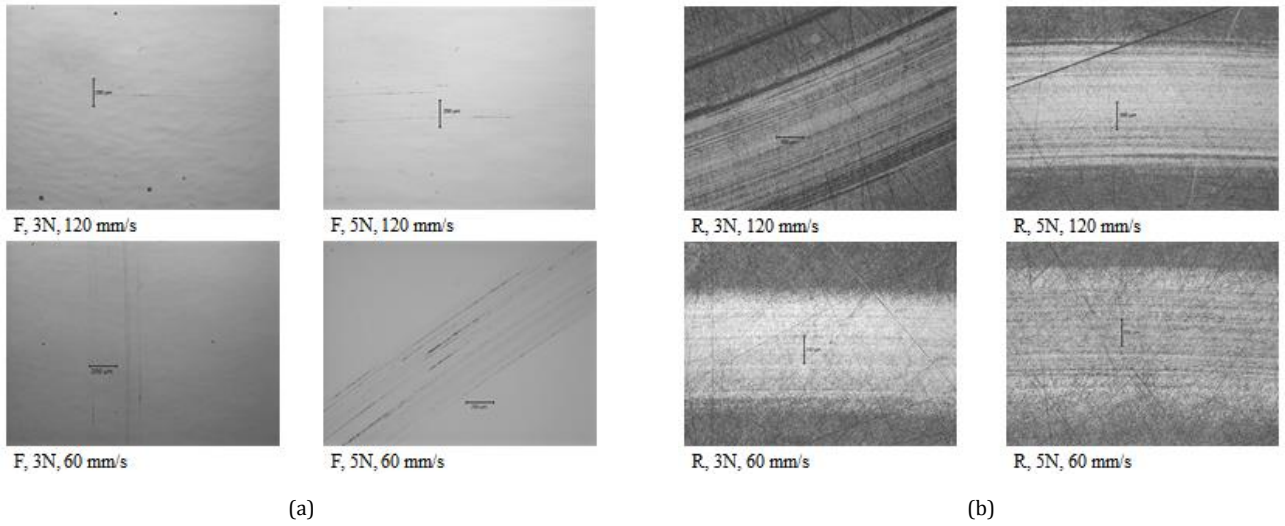
Parlatılmış disk numunelerinde sabit hızda yükün artması aşınma (disk ve bilyede) oranını artırmakta iken, yüksek pürüzlülük durumunda 60 mm/s hız ile 120 mm/s hızdaki etkileri birbirleri ile ters olarak etki ettikleri görülmektedir. Tüm bunlar deneylerdeki aşınma oranlarının üzerinden aşınma mekanizmasının izahında yanlış bir girizgâh oluşturabileceğini, bu konuda yorum yapılırken daha farklı parametreler ve sonuçlar ile birlikte ele alınması gerektiğini bize hatırlatmaktadır.

Deney sonuçları bize göstermektedir ki; Si_3N_4 malzeme karşılıklı çalışma durumunda, alışma periyodunda sürtünme katsayısı pürüzlülüğe, uygulanan yüke ve kayma hızına bağlı olmaktadır. Alıştırma periyodu, az pürüzlü yüzeylerde yüksek hız ve yük altında daha kısa olmaktadır. Seramik malzemelerin sürtünme katsayıları üzerindeki görüşler deneysel çalışmalara dayanması nedeni ile sorgulanması doğaldır. Oksit malzemelerin yüzeyleri arasındaki bağlara ilişkin modellerin yetersizliği de ayrıca fenomenin kolay anlaşılmasında güçlük doğurmaktadır. Oksitlerde atomik bağlar çoğunlukla güçlü kovalent bağlar iken yüzeyler arasında ise çoğunluk van der Waals ve az da olsa iyonik bağ şeklinde oluşmaktadır. Bu durum yüzeyler arasındaki düşük sürtünme katsayısını teşvik ederken yüzey pürüzlülüklerinin plastik deformasyonu ize sürtünme katsayısını artmasına yol açabilecektir. Üstelik bu durum yüzeyler arasına su ile yağlama söz konusu olunca olaylar daha da karmaşık hale gelecektir.

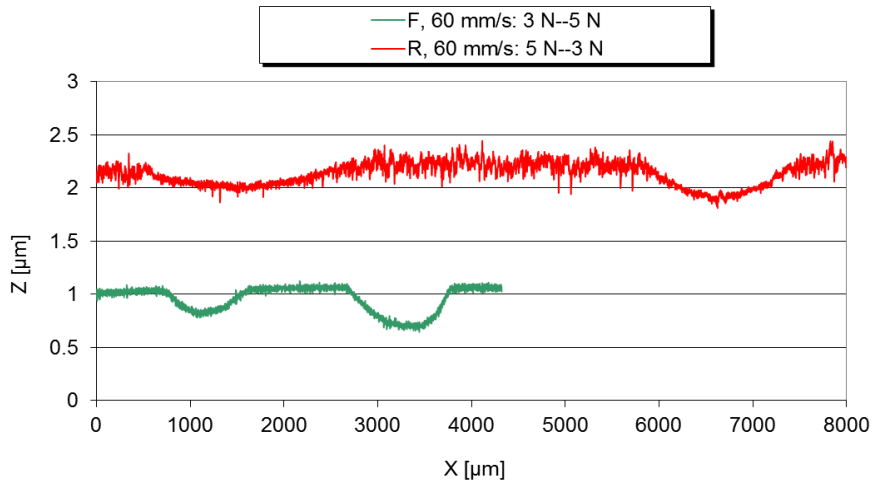
Si_3N_4 seramiklerin karşılıklı çalışması ve su ile yağlanması durumunda alışma periyodu sonrasında ultra düşük sürtünme katsayısı yüzeylerin elastik temas ile gevşek bağ mekanizmalarını birlikte meydana gelmesi şeklinde açıklanmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü tribo-kimyasal aşınma dolayısı ile azaldıkça temas nominal yüzey üzerinde gerçekleşmekte ve elastik deformasyon meydana gelmekte. Si_3N_4 yüzeyinde (SiO_x) tabakası birkaç nm seviyesinde meydana gelerek yüzeyindeki (O-H) bağları sayesinde sürtünme Si_3N_4 yüzeyi ile SiO_x film tabakası arasında gerçekleşmektedir. Ancak bu spekülasyonun doğrulanması için daha fazla araştırma ve moleküler dinamik simülasyonlar ile doğrulanması gerekmektedir.



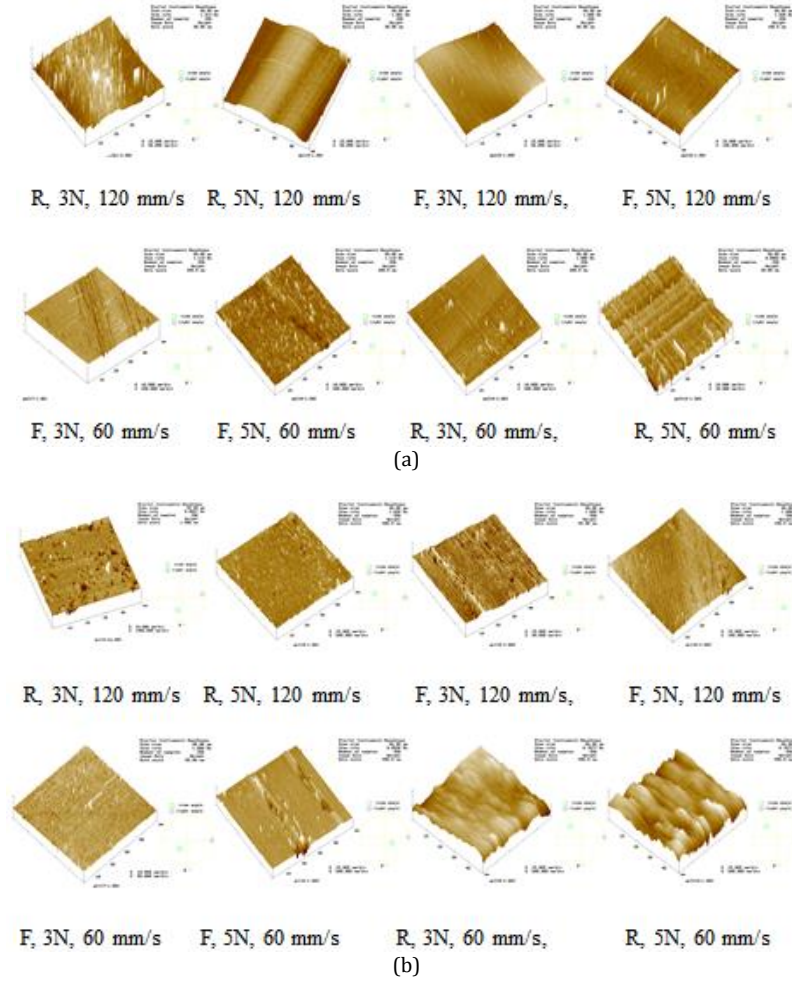
Şekil 8: Bilye aşınma izi (ölçek sabit, 250 μm).
(a) parlatılmış numuneler karşı çalışan bilyeler, (b) pürüzlü yüzeylere karşı çalışan bilye.



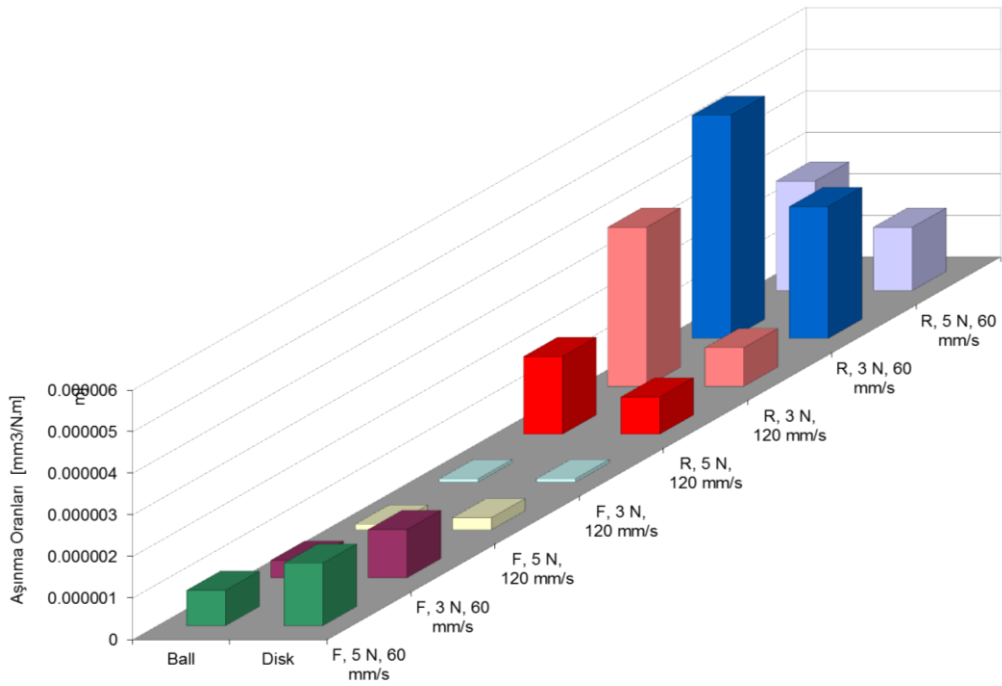
Şekil 9: Disk aşınma izi (ölçek sabit, 250 μm) (a) parlatılmış numuneler, (b) pürüzlü numuneler.



Şekil 10: Disk yüzeylerindeki tipik aşınma profilleri (stylus profilometre görüntüsü).



Şekil 11: Bilye ve Disk aşınma izleri AFM karakterizasyonları (ölçek sabit) (a) bilye aşınma izi, (b) disk aşınma izi.



Şekil 12: Yük, hız ve yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisi.

4 Sonuçlar

Si_3N_4 seramiklerin karşılıklı çalışması ve su ile yağlanması durumunda yapılan bu araştırmadan elde edilen sonuçlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir.

- Sürtünme mekanizması ve alışma moduna geçiş yük miktarı ve kayma hızı ile farklılaşmaktadır.
- Pürüzlü yüzeylere sahip (disk, bilye) numunelerin aşınmaları daha çok pürüzlerden meydana gelirken ve daha yaygın bir kesite yayılırken, parlatılmış numunelerin aşınması ise derinlemesine ve daha küçük bir kesitte meydana gelmektedir.
- Bu bağlamda parlatılmış numuneler ile pürüzlü numunelerin alışma modu mekanizmaları birbirlerinden farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada gelecek adına bu mekanizma farklılığı üzerinde fazla çalışılmamıştır. Ancak gelecek çalışmalar adına önemli bir ayrıntı olduğunu not etmekte yarar vardır.
- Si_3N_4 malzemelerin karşılıklı çalışma durumunda, alışma periyodunda sürtünme katsayısı pürüzlülüğe, uygulanan yüke ve kayma hızına bağlı olmaktadır. Alışma periyodu, az pürüzlü yüzeylerde yüksek hız ve yük altında daha kısa olmaktadır.
- Si_3N_4 yüzeyinde (SiO_x) tabakası birkaç nm seviyesinde meydana gelerek yüzeyindeki (O-H) bağları sayesinde

sürtünme Si_3N_4 yüzeyi ile SiO_x film tabakası arasında gerçekleşmektedir. Ancak bu spekülasyonun doğrulanması için daha fazla araştırma ve moleküler dinamik simülasyonlar ile doğrulanması gerekmektedir.

5 Kaynaklar

- [1] Tomizawa H, Fischer TE. "Friction and Wear of Silicon Nitride and Silicon Carbide in Water: Hydrodynamic Lubrication at Low Sliding Speed Obtained by Tribochemical Wear". *ASLE Transaction*, 30(1), 41-46, 1987.
- [2] Jahanmir S. "Wear Transitions and Tribochemical Reactions in Ceramics". *Engineering Tribology*, 216(6), 371-385, 2002.
- [3] Jahanmir S, Fischer TE. "Friction and Wear of Silicon Nitride Lubricated by Humid Air, Water, Hexadecane and Hexadecane + 0.5% Stearic Acid". *ASLE Transaction*, 31(1), 32-43, 1988.
- [4] Jahanmir S, Ozmen Y, IvesLK. "Water Lubrication of Silicon Nitride in Sliding". *Tribology Letters*, 17(3), 409-417, 2004.
- [5] Dong X, Jahanmir S. "Wear Transition Diagram for Silicon Nitride". *Wear*, 165(2), 169-180, 1993.
- [6] Woydt M, Schwenzien J. "Dry and Water-Lubricated Slip-rolling of Si_3N_4 - and SiC Based Ceramics". *Tribology International*, 26(3), 165-174, 1993.