

Akımsız Nikel- Fosfor Kaplanan Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi

Faruk Şahin

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2016

An Investigation on Wear Behavior of Electroless Nickel-Phosphor Coated Ti-6Al-4V Alloy

Faruk Şahin

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

September 2016

Akımsız Nikel-Fosfor Kaplanan Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi

Faruk Şahin

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

Kasım 2016

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Faruk ŞAHİN'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Akımsız Nikel-Fosfor Kaplanan Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Doç.Dr. Hakan GAŐAN

Üye : Doç.Dr. Melih Cemal KUŐHAN

Üye : Doç.Dr. Osman TORUN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Mustafa ULUTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK danışmanlığında hazırlamış olduğum “Akımsız Nikel-Fosfor Kaplanan Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi.” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçlarını etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. / / 2016

Faruk ŞAHİN

İmza

ÖZET

Titanyum alaşımları özellikle havacılık endüstrisinin gözde malzemelerindedir. Bu malzemelerin zayıf aşınma özellikleri nedeniyle kullanımları kısıtlanmaktadır. Ti alaşımlarının aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında Ti-6Al-4V alaşımına orta düzeyde akımsız Nikel-Fosfor kaplama uygulanmış ve akımsız nikel kaplamanın Ti-6Al-4V alaşımının aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler aynı koşullarda levha üzerine bilye (ball on disk) yöntemi ile aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve aşınma davranışları incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda Ni-P kaplanan numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde %45 -50 ve aşınma miktarlarında % 20-50 oranında azalma meydana gelmiştir. Akımsız Ni-P kaplama Ti-6Al-4V alaşımının aşınma direncine pozitif yönde etkisi olmuştur. En yüksek aşınma miktarları kaplanmamış malzemedeki, en düşük aşınma miktarları akımsız nikel kaplamada meydana gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Ti-6Al-4V alaşımı, Akımsız nikel kaplama, Aşınma, Sürtünme.

SUMMARY

Titanium alloys are one of the material groups that have particular importance in aviation industry. Using of these materials is restricted due to its poor wear characteristics. Various studies are performed to improve wear characteristics of the titanium alloys.

In this thesis, mid-level electroless Nickel-Phosphorus coating is applied to the Ti-6Al-4V alloy and the effect of electroless nickel plating to wearing behavior of Ti-6Al-4V is investigated. Coated and uncoated samples are subjected to ball on disk wearing test and their wearing characteristics are examined.

As a result of this study, Ni-P coated samples friction coefficient and wearing amounts are reduced 45-50% and 20-50% respectively. Electroless Ni-P coating improves wearing resistance of Ti-6Al-4V alloy. Highest amount of wearing is observed in uncoated samples where as lowest amount of wearing is observed in electroless nickel coated samples.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy, Electroless nickel plating, Wear , Coefficient.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince yapmış olduğu tüm katkılar ve sağladığı imkanlardan dolayı danışmanım Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK' e, tez çalışmalarımnda bana eşlik eden Arş.Gör. Abdullah SERT' e ve benden yardımlarını esirgemeyen 1'inci Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığında görevli Doktor Yük.Müh. Fehmi DİLTEMİZ ve Müh. Mustafa Hakan TOKSOY' a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman desteğini yanımda hissettiğim ve çok sevdiğim eşim Rabia' ya, bu tezin hazırlanma aşamasında gülücükleriyle beni motive eden canım kızım Azra' ya çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
2.1. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının Genel Özellikleri	2
2.2. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının İç Yapı Özellikleri	3
2.3. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Özellikleri.....	6
3. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMALAR	7
3.1. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarının Sınıflandırılması.....	8
3.2. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarında Oluşan Reaksiyonlar	9
3.3. Akımsız Nikel- Fosfor Kaplamalar	10
3.3.1. Düşük fosforlu kaplamalar	11
3.3.2. Orta fosforlu kaplamalar.....	11
3.3.3. Yüksek fosforlu kaplamalar.....	11
3.4. Akımsız Nikel – Fosfor Kaplamanın Yapısı	12
3.5. İç Gerilme	14
3.6. Düzensizlik	14
3.7. Yapışma	15
3.8. Mekanik Özellikler	15
3.9. Aşınma Direnci.....	16
3.10. Korozyon	17
3.11. Fiziksel Özellikler.....	18

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
4. SÜRTÜNME VE AŞINMA	19
4.1. Sürtünme	19
4.1.1. Kayma sürtünmesi.....	20
4.1.2. Yuvarlanma sürtünmesi.....	21
4.1.3. Sürtünme katsayısı	21
4.2. Aşınma	23
4.2.1. Abrasif aşınma	24
4.2.2. Adhesif aşınma.....	26
4.2.3. Yorulma aşınması	27
4.2.4. Eroziv aşınma	27
4.2.5. Korozif aşınma.....	28
4.3. Deneysel Aşınma Metotları.....	29
4.3.1. Levha üzerine bilye (ball on disk) yöntemi	29
4.3.2. Hertz temas teorisi	30
5. MATERYAL VE YÖNTEM	32
5.1. Kullanılan Malzemeler	32
5.2. Numune Hazırlama.....	32
5.3. Akımsız Kaplama Deneyi	34
5.4. Kaplama Kalınlığı ve EDS Analizi	36
5.5. Aşınma Testi	37
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
6.1. Akımsız Ni-P Kaplanan ve Kaplanmamış Numunelere Ait Deney Kodları.....	38
6.2. Ni-P Kaplanmış ve Kaplanmamış Numunelere Ait Aşınma Değerleri.....	39
6.3. Ni-P Kaplanmış ve Kaplanmamış Numunelere Ait Aşınma Yüzeyi SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri.....	42
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR DİZİNİ	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Titanyum alaşımlarının 3 boyutlu faz diyagramı	3
2.2. α , $\alpha + \beta$ ve β titanyum alaşımların mikroyapıları a) α fazı eş eksenli alaşımsız titanyum b) $\alpha + \beta$ sivri eşeksenli c) $\alpha + \beta$ eşeksenli Ti-6Al-4V d) Ti-13V-11Cr-3Al içinde eş eksenli	5
3.1. Ni-P faz diyagramı	12
3.2. Ni-P çekirdek büyümesinin iki boyutta şematik diyagramı a) kaplamalı malzemede düzenli tane dizilimi b) P birikiminden sonra Ni-P alaşımındaki kristal çekirdekler	13
3.3. Akımsız nikel kaplamada fosfor içeriğinin iç gerilmelere etkisi	14
3.4. Akımsız nikel kaplamada fosfor içeriğinin dayanım ve kırılmada birim uzama üzerinde etkisi	16
4.1. Birbirine temas eden cisimlerin kayma ve yuvarlanma hareketi	19
4.2. Sürtünme kuvvetini oluşturan kuvvetler	22
4.3. Makara sisteminde sürtünme kuvvetinin ölçülmesi	22
4.4. Gevrek ve sünek malzemelerde oluşan aşınma bölgeleri a) sünek bir malzemenin b) gevrek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması	25
4.5. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması	25
4.6. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması	26
4.7. Adhesif aşınma a) kaymaya başlamadan önce yüzeylerin birbiriyle yapışması b) kayma sonrası yüzeyde oluşan yapışmadan sonra meydana gelen plastik deformasyon	26
4.8. Belirli bir çevrim altındaki yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları	27
4.9. Eroziyon aşınma mekanizmaları	28
4.10. Korozif bir malzeme ile aşınmış yüzey arasındaki etkileşimler	29
4.11. Levha üzerine bilye aşınma testinin şematik gösterimi.....	30
4.12. Levha üzerine bilye yönteminde temas alanı	31
5.1. Numunelerin şematik olarak gösterimi	32
5.2. Akımsız kaplama deneyinde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı numuneler.....	33
5.3. Ti-6Al-4V alaşımı numunelerin a) mikroyapısı b) EDS analizi	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4. Hazırlanmış Ni-P banyosu ve kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numuneler	34
5.5. Ni-P Kaplama EDS Analizi	36
5.6. Ni-P Kaplama SEM Görüntüsü	37
5.7. Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği tribometre.....	37
6.1. Sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.....	41
6.2. Sürtünme kuvveti-mesafe grafiği.....	41
6.3. Ni-P kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma oranları grafiği.....	42
6.4. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü a) Ti64-1 numunesi b) Ti64-B numunesi	43
6.5. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi a) Ti64-1 numunesi b) Ti64-B numunesi	44
6.6. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü a) Ti64-2 numunesi b) Ti64-A numunesi	45
6.7. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi a) Ti64-2 numunesi b) Ti64-A numunesi.....	46
6.8. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü a) Ti64-3 numunesi b) Ti64-C numunesi	47
6.9. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi a) Ti64-3 numunesi b) Ti64-C numunesi	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri	2
2.1. Kaplama çeşitlerinin aşınma değerleri	17
4.1. Akımsız kaplama ön işlemleri	34
4.2. Akımsız nikel kaplama genel bileşimi ve çalışma tablosu	35
4.3. Akımsız Ni-P kaplama banyo bileşenleri	36
5.1. Ni-P kaplanmış numunelere ait deney kodları	38
5.2. Kaplanmamış numunelere ait deney kodları	39
5.3. Aşınma deney sonuçları	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler** α β **Açıklama**

Alfa

Beta

Kısaltmalar

HMK

SDH

Açıklama

Hacim Merkezli Kübik

Sıkı Düzen Hegzagonal

1. GİRİŞ

Dünyada gelişen teknoloji ve sanayileşme ile birlikte birçok alanda ortaya çıkan endüstriyel ihtiyaçların temelini malzemeler oluşturmaktadır. Mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi ile daha etkin ve verimli mühendislik sistemleri ortaya çıkarılabilmektedir. Sistemde malzemelerin birbirleriyle olan etkileşimi ilk olarak yüzeyde başlamakta ve deformasyon malzemenin yüzeyinden içeriye doğru ilerlemektedir. Yüzeyde oluşan bu deformasyonu ve oluşan kuvveti azaltmak amacıyla yüzey özelliklerini geliştirmek için farklı yöntemler kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır.

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direncini bir arada bulduran ender mühendislik malzemelerindedir. Bu iyi özelliklerine karşılık titanyum ve alaşımları düşük aşınma direnci ve basma direnci göstermektedir. Bu mühendislik sistemlerinde istenilen bir durum olmamakla birlikte birçok endüstriyel uygulamada titanyum ve alaşımları; hafiflik, geniş sıcaklık aralığında mukavemetini koruma ve çok düşük sıcaklıklarda çalışabilme gibi özellikleri nedeniyle kullanılmaktadır. Titanyumun zayıf olan tribolojik özelliklerini geliştirmek için birçok yüzey geliştirme yöntemi uygulanmaktadır.

Çeşitli yüzey geliştirme yöntemleri arasında kullanılan Nikel-Fosfor (Ni-P) kaplamalar kaplanan malzemeye iyi korozyon direnci, yüksek sertlik ve parlaklık kazandırmaktadır.

Yüksek lisans tez çalışmasında, Ti-6Al-4V alaşımı üzerine akımsız olarak orta düzeyde fosfor içeren Nikel-Fosfor (Ni-P) kaplanarak aşınma özellikleri incelenmiştir. Aşınma özelliklerinin incelenmesinde Levha Üzerine Bilye (Ball On Disk) yöntemi kullanılmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış Ti-6Al-4V alaşımına deneysel olarak aynı koşullar altında aşınma testi uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının Genel Özellikleri

1791 yılında İngiliz araştırmacı ve mineralojist William Gregor tarafından keşfedilen Titanyum elementi dünyada rezerv olarak 4'üncü sırada bulunmaktadır. Genel olarak titanyum ve alaşımlarının kullanımı uzay, uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmış olsa da, son otuz yılda bu metalin işleme yöntemlerindeki gelişmelere paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı da artmıştır.

Titanyum alaşımları arasında en yaygın olarak kullanılan % 6 oranında alüminyum ve % 4 oranında vanadyum içeren Ti-6Al-4V alaşımıdır. Ti-6Al-4V alaşımlarının en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Uzay, uçak ve biyomedikal endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Boyer, R. vd., 1994). Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1.' de gösterilmiştir.

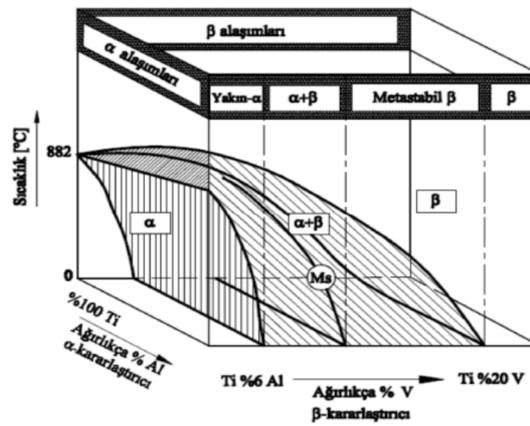
Çizelge 2.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri
(Zeng, L. ve Bieler, T.R., 2005).

Fiziksel Özellikler		Kimyasal İçerik	
	Değer		Ti6Al4V
Yoğunluk gr/cm ³	4,42	Alüminyum, Al	6,00%
Ergime Sıcaklığı °C	1649	Vanadyum, V	4,00%
Özgül Isısı J/Kg °C	560	Demir, Fe	0,10%
Hacimsel Elektrik Direnci ohm.cm	170	Oksijen, O	0,15%
Isı İletkenlik Katsayısı W/m.K	7,2	Nitrojen, N	0,01%
Isıl Yayılma Katsayısı 0-100 °C / °C	8,6 x 10 ⁻⁵	Hidrojen, H	<0,003%
Isıl Yayılma Katsayısı 0-100 °C / °C	9,2 x 10 ⁻⁵	Karbon, C	0,03%
β Dönüşüm Sıcaklığı °C	999	Titanyum, Ti	Denge Miktarı

2.2. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının İç Yapı Özellikleri

Titanyum allotropik karakterde bir malzemedir. Oda sıcaklığındaki sıkı düzen hekzagonal (SDH) kristal yapıdaki α fazı, saf titanyum için yaklaşık 885°C'de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmektedir. Bu sıcaklık “ β dönüşüm sıcaklığı” adını almaktadır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı kılan elementlerin etkisiyle β dönüşüm sıcaklığı yükselirken; metalik kalıntılar veya alaşım elementlerinin etkisiyle düşmekte ya da yükselebilmektedir (Boyer, R. vd. , 1994).

Alaşım elementlerinin ilavesi bu dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa “ α dönüşüm sıcaklığı”; üstündeki sıcaklıklarda tüm alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa “ β dönüşüm sıcaklığı” denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır (Boyer, R. vd., 1994). Şekil 2.1.’de Titanyum alaşımlarının 3 boyutlu faz diyagramı verilmiştir.



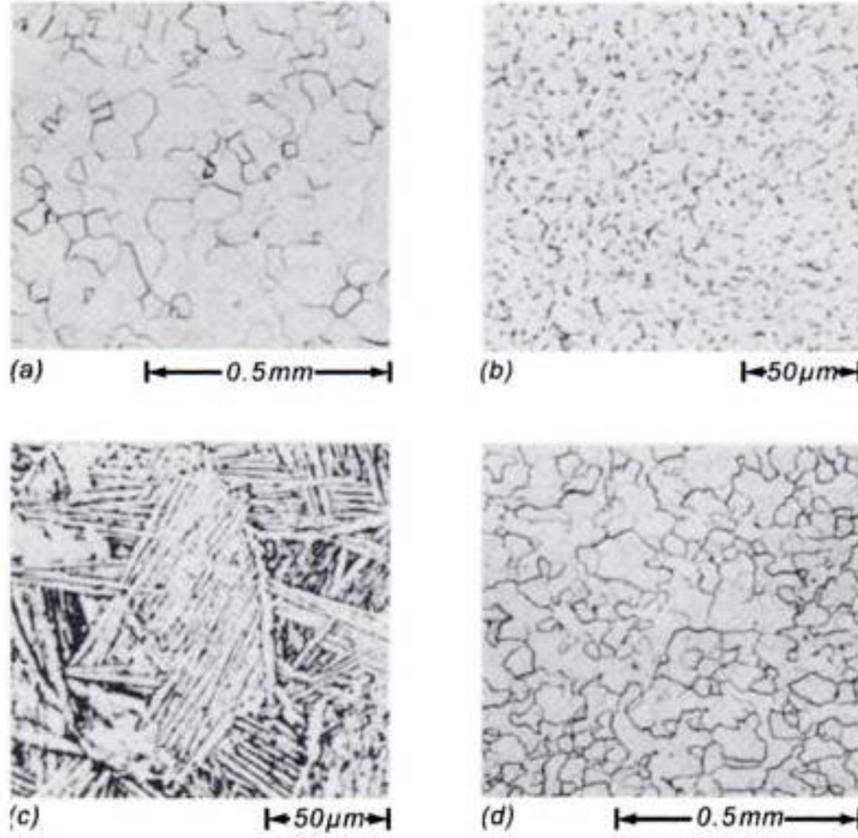
Şekil 2.1. Titanyum alaşımlarının 3 boyutlu faz diyagramı (Leyens, C. vd., 2003).

α fazını kararlı hale getiren ve dönüşüm sıcaklığını yükselten en önemli alaşım elementi alüminyumdur. Ara yer elementlerinden olan oksijen, azot ve karbon da α fazını kararlı hale getiren diğer elementlerdendir. Dönüşüm sıcaklığını düşürerek β fazını kararlı hale getiren iki grup element vardır. Bunlar β izomorf ve β ötektik elementleri olarak adlandırılırlar. İzomorf grup β fazı içinde bulunan molibden, tantalyum, vanadyum ve kolombiyum elementleri bu faz içinde tamamen çözünebilmektedirler. Diğer grup olan β ötektik elementleri ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir.

Bunlar manganez, demir, krom, silisyum, nikel, bakır ve kobalttır. Bu elementler α fazında düşük çözünürlüğe sahip olup, dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler. Gerek β fazını kararlı hale getirmek gerekse yüksek sıcaklıktaki kullanımlarda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltmak için, bu β izomorf grup elementleri alaşım içerisine katılmalıdır (İçdem, C., 2007).

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK β kıyaslandığında, SDH α daha yoğun paketlenmiştir ve anizotropik bir kristal yapıya sahiptir. α fazı β ile karşılaştırıldığında, plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği, sünekliğinin daha düşük olduğu, mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık β difüzyon hızının iki katı olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilediği söylenebilir. En önemli α kararlılaştırıcı elementi olan alüminyumun yoğunluğu titanyumun yaklaşık yarısı kadardır. Bu sebeple α alaşımlarında vanadyum ve molibden gibi daha ağır elementler kullanılsa da, α alaşımları daha hafiftirler. α alaşımları genelde orta derece mukavemete sahiptir. $\alpha + \beta$ alaşımları yüksek, yarı kararlı β alaşımları ise çok yüksek mukavemete sahip olabilirler. Ancak çok yüksek mukavemet değerlerine erişebilen β alaşımları bu özellik için sünekliklerinden taviz vermek durumundadırlar. Süneklik büyük ölçüde mikro yapıya bağlı olsa da, β alaşımlarına çökelme sertleşmesi uygulanmadığı zaman sünekliği α ve $\alpha + \beta$ alaşımlarıninkine yakın olabilir (Akagündüz, E., 2008).

$\alpha + \beta$ grubu içerisinde yer alan Ti-6Al-4V alaşımı bünyesinde %6 alüminyum kararlılaştırıcısı ile α fazını, %4 vanadyum kararlılaştırıcısı ile de β fazını içermektedir (Joshi V.A., 2006). Bu alaşım daha fazla α kararlılaştırıcısı (Al) içerdiğinden faz diyagramında α yakın bölgede bulunmaktadır. α kararlılaştırıcısı olan alüminyum katı çözeltili mukavemetinin artmasını sağlar. α_2 fazının oluşumundan kaçınmak amacıyla alüminyum içeriği genelde % 6 civarında tutulur. α_2 fazı, Ti-6Al-4V alaşımının süneklik, korozyon direnci ve tokluğunda azalmaya neden olur. Titanyumda her zaman mevcut olan oksijen, α fazı katı çözeltili mukavemet artırıcı olarak görev yapar (Grujicic, M. vd., 1992). Şekil 2.2.'de α , $\alpha + \beta$ ve β titanyum alaşımların mikroyapıları gösterilmiştir (Lütjering, G. ve Williams, J.C., 2007).



Şekil 2.2. α , $\alpha + \beta$ ve β titanyum alaşımların mikroyapıları a) α fazı eş eksenli alaşımsız titanyum b) $\alpha + \beta$ sıvri eşeksenli c) $\alpha + \beta$ eşeksenli Ti-6Al-4V d) Ti-13V-11Cr-3Al içinde eş eksenli β (Lütjering, G. ve Williams, J.C., 2007).

Ti-6Al-4V alaşımı içerisinde bulunan vanadyum β kararlılaştırıcısıdır ancak α fazında çözünmez ve bu fazdan dışarı atılır. Bu yüzden vanadyum, β fazının küçük bölgelerinde birikir. β fazı α matris içerisinde düzgün olarak dağılmıştır. α ve β fazlarının içeriğinin birbirinden farklı olması nedeniyle bu iki faz tane büyümesine karşı oldukça kararlıdır. Tane büyümesi için daha fazla difüzyona ihtiyaç duymaktadır. Sonuç olarak Ti-6Al-4V alaşımı nispeten ince bir mikro yapıya sahip olup, genellikle dayanımlarını tane sınırı mukavemetlenmesinden alır (Rhodes, C.G. ve Paton, N.E., 1979).

Titanyumun yüksek oksijen afinitesi, oda sıcaklığında dahi yüzeyinde çok ince (nm mertebesinde) bir oksit tabakası oluşmasına sebep olur. Titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının sebebi yüzeyde oluşan bu oksit tabakasıdır. α alaşımlarının korozyon dayanımları, β alaşımlarından daha yüksektir. Bu durum α fazını kararlı hale getiren oksijenin varlığından kaynaklanmaktadır (Akagündüz, E., 2008).

2.3. Titanyum ve Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma zellikleri

Yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve iyi korozyon direnci gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan titanyum ve alaşımları sürtünme ve aşınmanın yer aldığı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Titanyum alaşımlarında adhezif aşınma direncinin düşük olmasının temel nedeni titanyumun kayma sırasında karşı malzemeye çok güçlü yapışmasıdır. Bu durum titanyumun sünekliği ve kimyasal reaktifliğinden kaynaklanmaktadır. Kayma sırasında sürtünme katsayısı sabit değildir ve çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Pürüzlerin birbirine temas ettiği bölge üzerinde gerçek temas alanındaki yapışma plastik deformasyonu arttırmaktadır (Imam, M.A. ve Fraker, A.C.,1996; Dearnly, P.A.,1999).

Titanyumun tribolojik özelliklerinin zayıf olmasının nedenleri; titanyumun elektron düzeninden, kristal yapısından ve yağlayıcıların yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Titanyumun elektron düzeni düşük değerli bir d-band karakterine sahiptir. Bundan dolayı titanyumun yüzeyi aşırı reaktif özellik taşır. SDH yapıya sahip metaller iyi bir sürtünme özelliğine sahip olmasına rağmen bu durum titanyum için pekte geçerli değerildir. Bunun nedeni metallerde ideal sıkı paket oranı 1,633 iken bu değer titanyumda 1,588'dir. Bu durum, taban düzlemlerinin yanı sıra prizmatik ve piramidal kayma düzlemlerini kaymaya teşvik eder. Kayma sistemlerinin artması, sünekliğin artmasına neden olur ve aşınmanın maruz kaldığı yüzeyde plastik deformasyonu artırır.

Eski tip yağlayıcılar çoğu metalde başarılı olmasına rağmen, titanyum alaşımlarında kullanıldığında yetersiz kalmaktadır. Ayrıca titanyumun düşük ısıl iletkenliği de bu tip yağlayıcıların etkisini azaltmaktadır (Long, M. ve Rack, H.J., 2001). Ancak günümüzde kullanılan nano metal takviyeli iletken yağlayıcılar titanyumun tribolojik özelliklerine pozitif katkı sağlamıştır.

Titanyumun sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek amacıyla birçok yüzey geliştirme tekniği uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Bunlara örnek olarak Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), Nitrürleme, Termal Sprey ve Akımsız Nikel Kaplama vb. verilebilir.

3. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMALAR

Akımsız nikel kaplama; katalitik metal veya katalize edilmiş metal olmayan malzeme üzerine kimyasal reaksiyon ile fosfor veya bor içeren nikelin kaplanmasıdır. Akımsız nikel kaplama uygulaması birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Dünya ekonomisinde metal kullanımının artışına paralel olarak, bu metallerin tahrip olma tehlikesi de artmaktadır. Modern yüzey teknolojisinin esas amacı endüstriyel, taşıma ve servis araç gereçlerinin ömrünü artırmak ve bunlara uygun dekoratif ve fonksiyonel kaplamalar sunmaktır. Pratikte bu amaç için nikel büyük bir kullanım alanına sahiptir. Nikel kaplama teknolojisi daima gelişim halindedir. Günümüzde nikel kaplama modern yüzey teknolojisinin en çok kullanılan proseslerinden biri haline gelmiştir (Kahrıman, A. ve Avcı, E., 2005).

Akımsız nikel kaplamalar birçok alanda geniş kullanım alanına sahiptir. Uzay ve otomotiv endüstrisi, kimyasal işlem sanayilerindeki uygulamalar, medikal ve dental aletler, askeri uygulamalar ve korozyona, aşınmaya karşı iyi direnç sağlanması düşünülen yerlerde uygulamaları mevcuttur (Chen, B.H. vd., 2002).

Akımsız nikel kaplamaların en önemli tercih edilme sebepleri;

1. Kaplama kalınlığının malzemenin her bölgesinde aynı olması,
2. Çok iyi bir korozyon direnci,
3. Aşınmaya karşı mukavemet,
4. Yüksek kaplama sertliği,
5. Kaydırıcılığının yüksek olması,
6. Lehim kabiliyetinin yüksek olmasıdır (Zhang, Q. vd., 2005).

Akımsız nikel kaplamalar alüminyum, pirinç, bronz gibi alaşımlar ile çelik ve metalik malzemelere uygulanabilmektedir. Kimyasalın ulaştığı her bölgede kaplama homojen bir yapıya sahiptir. Kaplamanın her bölgeye homojen olarak dağılması kaplamanın ana avantajıdır. Dezavantaj olarak ise; banyoların yüksek standartlarda kalite kontrol gerektirmesi, banyo bileşenlerinde pahalı kimyasallar kullanılması sonucu maliyetinin yüksek oluşudur (Cheong, W.J. vd., 2004).

Akımsız nikel kaplama uygulamalarında alaşımın biriktirilmesi için asidik ve bazik olmak üzere temel iki banyo tipi vardır. Akımsız alaşım kaplamalar metalik iyonların katalitik yüzey üzerine kontrollü indirgenmesi ile oluşurlar. Biriktirilen kaplama otokatalitik yüzey davranışı göstererek indirgenme tepkimesini katalitik olarak devam ettirir. Bu sayede yüzey banyo çözeltisi ile temas halinde kaldığı ve banyo çözeltisinde metalik iyonlar tükenmediği sürece tepkime devam etmektedir. Herhangi bir dış akım uygulaması olmadığından altlık malzemenin kesitlerinden bağımsız olarak tekdüze şekilde gerçekleşir. Kaplama prosesindeki değişiklikler banyo bileşenlerine (İndirgeyici, kompleks oluşturucu madde, stabilizör vb.) ve deney şartlarına (Sıcaklık, pH) bağlıdır (Agarwala, R. ve Agarwala, V., 2003).

3.1. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarının Sınıflandırılması

Akımsız nikel kaplamalar temelde nikel–fosfor veya nikel– bor alaşımlarıdır. Hem alaşım türleri hem de asidik veya alkali olma durumlarına göre akımsız nikel kaplama banyoları 4 gruba ayrılmaktadır.

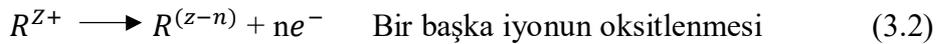
1. Alkali, Nikel-Fosfor
2. Asidik, Nikel-Fosfor
 - a. Yüksek Fosforlu
 - b. Orta Fosforlu
 - c. Düşük Fosforlu
3. Alkali, Nikel-Bor
4. Asidik, Nikel- Bor banyolarıdır.

Ayrıca indirgeyici ortamın cinsine göre banyolar;

1. Hipofosfitli banyolar
2. Borhidrüllü banyolar
3. Hidrazinli banyolar. Olarak sınıflanmaktadır (Henry, J.R., 1997).

3.2. Akımsız Nikel Kaplama Banyolarında Oluşan Reaksiyonlar

Akımsız nikel kaplama katalitik etkiye sahip metal yüzeyinde nikel iyonlarının bir indirgeyici yardımı ile indirgenerek nikel metaline dönüşmesi esasına dayanır. Nikel metalinin de aynı zamanda katalitik etkisi olduğu için nikelin metalik hale dönüşmesinden sonra reaksiyon nikel yüzeyinde devam eder. Metal iyonunun indirgenmesi;



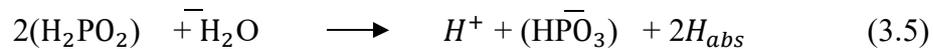
Denklem (3.1) ve (3.2)' de kısmi reaksiyonlar ve denklem (3.3)' de verilen toplam reaksiyon ile tepkimeler basit bir biçimde gösterilmiştir. Banyolarda kullanılan indirgeyicilerin cinsine bağlı olarak nikel metalini ile birlikte fosfor (Hipoposfit indirgeyiciler dahil) açığa çıkar ve bu şekilde ortaya çıkan nikel katmanı arı nikel olmayıp, bir nikel-fosfor veya nikel-bor alaşımıdır. İndirgeyici olarak hidrazin kullanılması durumunda saf nikel kaplamalar elde edilebilir.

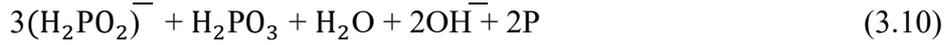
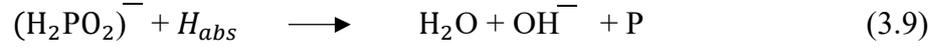
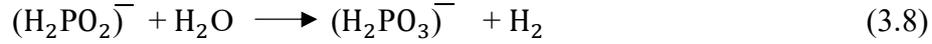
Periyodik tabloda nikelide için alan 8'inci grup elementler katalitik etki gösterirler. Bu etki sayesinde nikelin metal yüzeyine ilk yığılması gerçekleşir. Akımsız kaplama prosesi kendi kendini devam ettirmesi nedeniyle otokatalitik olarak tanımlanır.

Sodyum hipofosfi en çok kullanılan indirgeyicidir. Kimyasal bileşimi $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ' dur. Nikel iyonlarının indirgenmesi aşağıda verilen denklem ile oluşur;



Reaksiyon aktif katalitik yüzeylerde ve artan asidik oluşum ile ortofosfiti oluşturur.





Yüzeyin katalitik ve enerjinin yeterli olması durumunda pofosfit iyonları ortofosfite yükseltgenir. Açığa çıkan hidrojenin bir kısmı katalitik yüzeyde absorbe olur. Bu durumda katalizör yüzeyinde bulunan nikel, absorbe edilmiş aktif hidrojen tarafından indirgenir. Absorbe edilmiş hidrojenin bir miktarı aynı zamanda katalitik yüzeydeki az miktardaki hipofosfiti suya, hidroksil iyonuna ve fosfora indirger. Mevcut hipofosfitin büyük kısmı katalitik olarak nikel ve fosfor çözeltisinden bağımsız bir şekilde ortofosfite ve hidrojen gazına yükseltgenir ve akımsız nikel çözeltilerinde düşük verime yol açar. Denklem 3.10'da görüldüğü gibi nikel ile birlikte fosfor açığa çıkar ve bu fosfor kaplanan tabakaya karışır.

3.3. Akımsız Nikel- Fosfor Kaplamalar

Akımsız nikel-fosfor kaplamalar ağırlıkça %1 ile % 13 arasında fosfor içeren kaplamalardır. Elde edilen kaplamanın özellikleri banyo içeriğine ve çalışma koşullarına bağlıdır. Fosfor içeriğinin kimyasal ve fiziksel özelliklerin belirlenmesinde rolü vardır. Fosfor içeriğine göre kaplama özellikleri değişiklik gösterir. Bu nedenle nikel-fosfor kaplamalar fosfor miktarına göre 3 gruba ayrılır.

1. Düşük fosforlu kaplamalar
2. Orta fosforlu kaplamalar
3. Yüksek fosforlu kaplamalar

3.3.1. Düşük fosforlu kaplamalar

Orta ve yüksek fosforlu kaplamalardan daha maliyetli olan bu kaplamalar, ağırlıkça %1-%4 arasında fosfor içerir. Elektrik endüstrisinde hafıza kartlarında, alimünyum konektörlerde kullanılmaktadır. Genel olarak özellikleri;

1. Yüksek kaplama sertliği,
2. Mükemmel aşınma direnci,
3. Alkali ortamda yüksek korozyon direnci,
4. Yüksek ergime noktası (1200°C)
5. Kolay lehimlenebilmesidir.

3.3.2. Orta fosforlu kaplamalar

Orta fosforlu kaplamalar, düşük fosforlulara göre daha düşük maliyetli olması, bunun yanında yeterli fiziksel iyileşmeyi de sağlaması açısından endüstride daha yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Orta fosforlu kaplamalar, ağırlıkça %4-%10 arasında fosfor içerirler. Bu tür kaplamalar;

1. Alkali ve asidik iki ortamda da iyi korozyon direnci,
2. Mükemmel kayganlık,
3. Parlak görünüm sağlar.

Diğer tür kaplamalara göre maliyeti en düşük kaplamadır. Orta fosforlu kaplamalar; motor yatakları, pistonlar, amortisörler, debriyaj balataları, ABS parçaları vb. parçalarda kullanılmaktadır.

3.3.3. Yüksek fosforlu kaplamalar

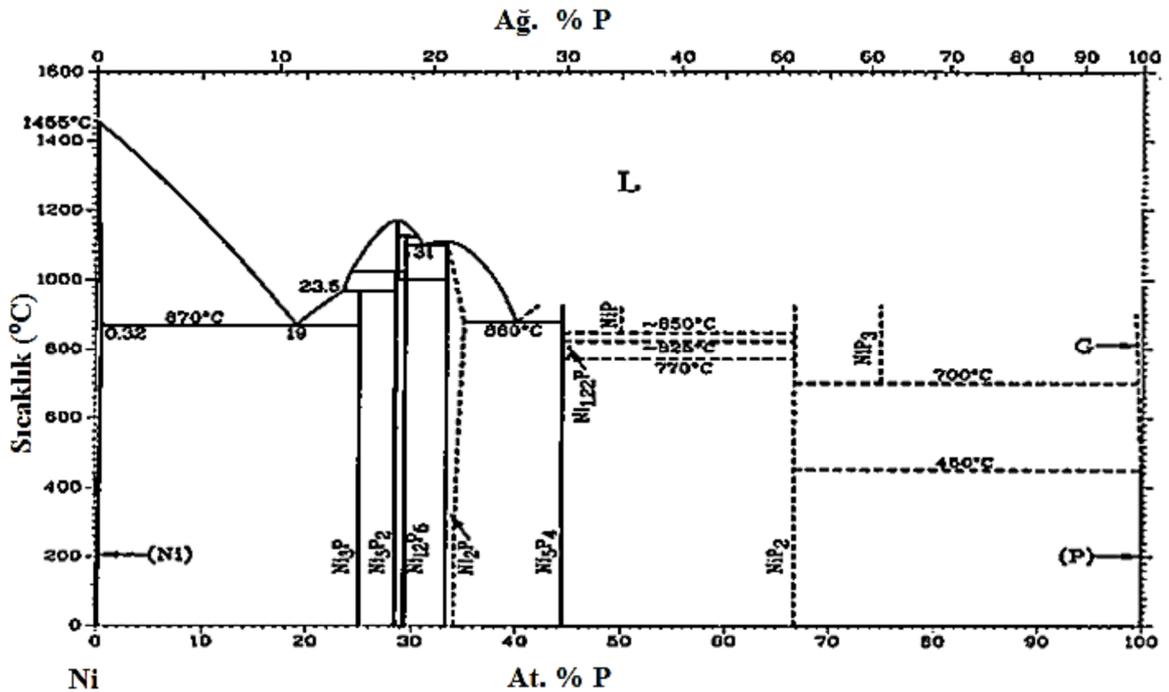
Ağırlıkça %10-%13 oranında fosfor içeren kaplamalardır. Bu tür kaplamaların özellikleri;

1. Çok farklı ortamlarda yüksek korozyon direnci,
2. Kolay lehimlenebilme,
3. Mükemmel süneklik,
4. Manyetik olmama,
5. Mükemmel difüzyon bariyer,
6. Yüksek kalınlıkları kolaylıkla oluşturabilmektedir.

Yüksek fosforlu kaplamalar; genellikle yüksek korozyon dayanımı istenen yerlerde, uçak-uzay endüstrisinde jet motorlarının kompresör ve stator bileşenlerinde, petrol ve doğalgaz endüstrisinde küresel vanalar, ısı dönüştürücüler ve pompalar vb. malzemelerde kullanılmaktadır.

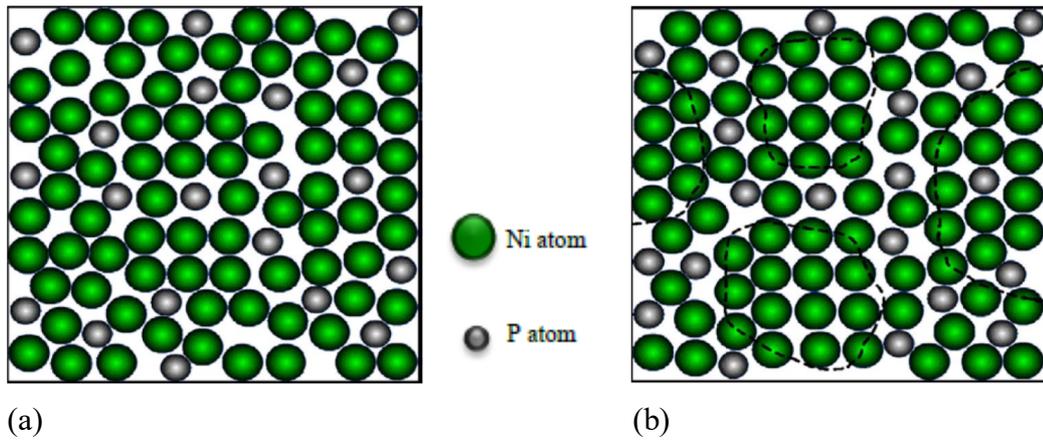
3.4. Akımsız Nikel – Fosfor Kaplamanın Yapısı

Hipofosfit indirgenmiş akımsız nikel, mühendislik olarak kullanılan az sayıdaki metalik camlardan biridir. Şekil 3.1.' de Ni-P faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.1. Ni-P faz diyagramı (Mallory, G.O. ve Hadju, J.B., 1990).

Akımsız nikel-fosfor kaplamalarda fosfor oranının kaplamanın atomik düzen ve faz değişimleri üzerine etkisi vardır. Akımsız kaplamada fosfor oranının artması kaplamanın mikroyapısında bulunan P atomları ve Ni atomlarının düzenli dizilimini bozarak nanokristal yapıdan amorf yapıya dönüştürür. Şekil 3.2.' de gösterildiği gibi Ni-P alaşımlarının hepsinde (Ni-Ni ve Ni-P kümeleri gibi) kısa mesafeli düzen vardır (Jiaqiang, T.G. vd., 2005; Luborsky, F.E. vd. , 1983). Isıl işlem boyunca yapısal gevşemeden sonra, P kısa mesafeli düzene ayrılır ve aynı anda Ni atomlarının küme boyutu artar. Bu kümeler kristal embriyolar ya da kristal çekirdekleri gibi davranır ve Ni kristalleri oluşur.

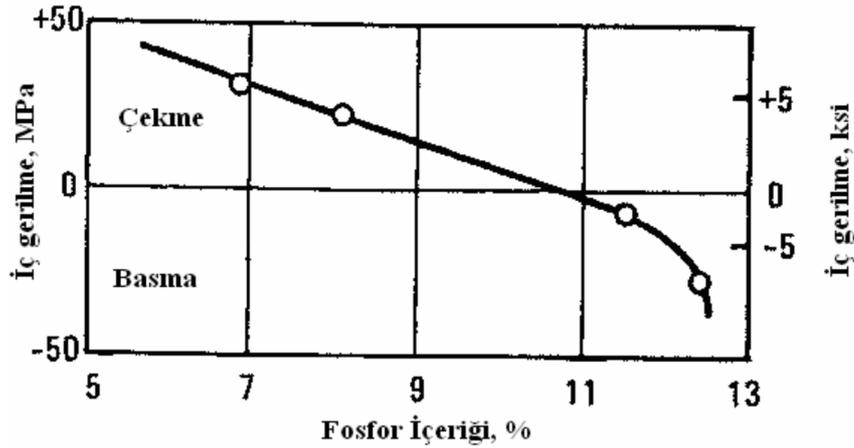


Şekil 3.2. Ni-P çekirdek büyümesinin iki boyutta şematik diyagramı a) kaplamalı malzemede düzenli tane dizilimi b) P birikiminden sonra Ni-P alaşımındaki kristal çekirdekler (Yemenci, S., 2015).

Düşük fosforlu alaşımlar fosforca süper doymuş katı çözeltilerdir ve Ni-P alaşımlarının mikroyapısında amorf, mikrokristal ve kristal nikel fazlarının karışımı olduğu bilinmektedir (Agarwala, R.C. vd., 1988; Kumar, P.S. vd., 1996). Yüksek fosfor içeren alaşımlar yapısal olarak tamamen amorf turlar ve metal camsı yapıdadırlar. Orta düzeyde fosfor içerenler ise hem amorf hem de nanokristal yapının karışımını içerirler (Luborsky, F.E. vd., 1983; Keong, G.E. vd., 2003). Akımsız nikel-fosfor kaplamalar 220-260 °C üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılırsa yapısal değişiklikler oluşmaya başlar. Akımsız nikel-fosfor kaplamanın amorf yapısını kaybedip kristal yapıya döndüğü sıcaklık 320°C'nin üzerindedir. Sıcaklık yükseldikçe nikel fosfat parçacıkları toplanır ve iki fazlı bir alaşım oluşur. Bu değişiklikler, kaplamanın sertlik ve aşınma direncinde hızlı bir artışa neden olur. Korozyon direnci ve sünekliğin azalmasına yol açar (Gawrilow, G.G., 1979; Stallman, K. ve Specthardt, H., 1981; Duncan, R.N.,1981).

3.5. İç Gerilme

İç gerilme, akımsız nikel kaplamalarda kaplama bileşiminin bir fonksiyonudur. Şekil 3.3.'de belirtildiği gibi % 10' dan fazla yüksek fosfor içeren kaplamada iç gerilme yoktur veya basma gerilmesi mevcuttur. Minimum gerilme için sınır fosfor değerinin %10 olduğu söylenebilir. Fakat kaplamadaki fosfor miktarı az ise; kaplama ve ana malzeme arasında ısıl genişleme farkından dolayı 15-45 MPa arası değişen çekme gerilmeleri oluşur ve bu değerlerde tolere edilebilir. 200 °C 'nin üzerindeki ısıl işlemler çekme gerilmesini arttırırken basma gerilmesini azaltır. Fosfor miktarı arttırmak, oluşan çekme gerilmesini basma gerilmesine yönlendirebilmek maksadıyla uygulanabilir. Yüksek seviyedeki gerilme kaplamadaki çatlama ve gözenekleri artırır (Parker, K., 1981; Gawrilow, G.G., 1979).



Şekil 3.3. Akımsız nikel kaplamada fosfor içeriğinin iç gerilmelere etkisi.

3.6. Düzgünlük

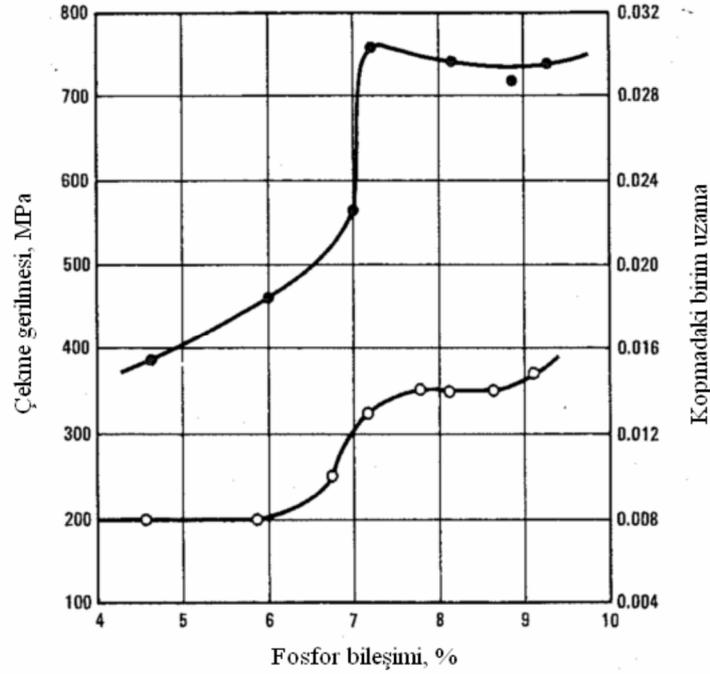
Düzgün kaplama kalınlığı akımsız nikel kaplamanın en önemli özelliklerinden biridir. Kaplama hızı ve kalınlığı bütün yüzey alanlarında aynı olması sebebiyle son bir yüzey işlemi gerektirmez. Kaplama kalınlığı yüzeyin çalışacağı koşullar dikkate alınarak belirlenmelidir. Genellikle uygulanan kaplama kalınlığı 2,5 ile 25 mikron arasındadır. Korozif şartlarda kullanılacak parçalarda kaplama kalınlığı 25-75 µm aralığında tercih edilir. 75 µm üstü kalınlıklar parça kurtarmak için tercih edilmektedir. Kaplama kalınlığı kaplama süresi ile doğru orantılıdır. Kaplama süresini artırarak daha fazla kaplama kalınlığı elde edilir. Fakat kaplama kalınlığının artması yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.

3.7. Yapışma

Akımsız Ni-P kaplamanın metallerin birçoğuna yapışma özelliği mükemmeldir. İyi temizlenmiş katalitik bir yüzeyde kaplamanın başlangıcıyla parçaya hem metalik hem de mekanik olarak yapışmaya başlar. Çelik malzemelerde yapışma kuvveti 300-400 MPa değerindedir. Katalitik yüzeye sahip titanyuma da yapışması çok iyi seviyededir. Paslanmaz çelik gibi katalitik olmayan veya pasif metallerde kaplamanın başlangıcında yapışma olmaz. Uygun ön işleme 140 MPa kuvvetinde bağ oluşur. Alüminyum gibi malzemelerde ise kaplama sonrası 1-4 saat arası 130-200 °C ‘ de ısıtma işlemi yapışmaya pozitif yönde etki eder (Asm, 1994).

3.8. Mekanik Özellikler

Kaplamaların mekanik özellikleri çekme, basma ve kayma vb. deneylerle tespit edilmektedir. Akımsız nikel kaplamalar camların mekanik özelliklerine çok benzer özelliktedir ve yüksek dayanım, sınırlı süneklik ve yüksek elastisite modülüne sahiptir. Orta ve yüksek düzeyde fosfor içeren kaplamalarda çekme dayanımı yaklaşık olarak 700 MPa’ın üzerindedir. Bu değer kaplamanın dayanımını gösterdiği gibi pek çok çelik türünün sahip olduğu değer üzerindedir. Akımsız nikel kaplamanın sünekliği fosfor içeriği ile de değişiklik göstermektedir. Yüksek fosfor içeren kaplamalar yaklaşık % 1 ile % 1,5 (Uzama miktarı olarak) arası sünekliği sahiptir. Düşük fosforlu kaplamalarda süneklik yüksek oranda azalır ve sifıra yaklaşabilir (Graham, A.H., 1963; Hentschel, T. vd., 2000). Şekil 3.4.’de fosfor içeriğinin dayanım ve birim uzama miktarı üzerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Akımsız nikel kaplamada fosfor içeriğinin dayanım ve kırılmada birim uzama üzerindeki etkisi.

Ni-P kaplamaların sertliği 500-600 HV₁₀₀ civarındadır. Çökelme sertleşmesi ısı işlemleri ile bu alaşımlarda sertlik artırılabilir ve birçok ticari sert krom kaplamaya eşdeğer olan 1100 HV₁₀₀'ye kadar yüksek sertlik sağlanabilir (Gavrilow, G.G., 1979). Fosfor içeriği sertliğe etki eder. Akımsız nikel fosfor kaplamalı malzemelerin sertliği fosfor içeriğinin azalmasıyla artar. Düşük fosforlu içerikli kaplamalarda yüksek sertlik değerlerinin nedeni iç gerilmelerdir (Bayes, M. vd., 1991). Yapılan çalışmalar fosfor oranının azalması kristalizasyon boyunca ara yer Ni₃P kararlı fazların ve ince Ni kristallerinin oluştuğunu göstermektedir. İnce Ni₃P fazları sertleştirme etkisinden dolayı yüksek mukavemet ve kayma modülüne sahiptir (Yemenci, S., 2015).

3.9. Aşınma Direnci

Aşınma; birbiri ile etkileşim halinde olan malzemelerin yüzeyinden malzeme kaybı olarak tanımlanır. Akımsız Ni-P kaplamanın aşınma ve yıpranmaya karşı direnci mükemmeldir. Laboratuvar test sonuçları bize şunu göstermiştir; ısı işlem uygulanmış nikel tabakasının yağlı veya yağsız olarak aşınmaya karşı direnci sert krom ile eşdeğerdir. Bu sebeple akımsız Ni-P kaplamalar sert krom kaplamaya ve yüksek alaşımlı malzemeye olan

ihtiyacı ortadan kaldırır. Çizelge 3.1.'de sert krom ve çeşitli oranlardaki Akımsız Ni-P kaplamalar Taber aşınma deneyinde karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1. Kaplama çeşitlerinin aşınma değerleri (Kaya, B., 2007).

Kaplama	Isıl İşlem 1 Saat İçin		Taber Aşınma Değerleri (mg/1000)
	°C	°F	
Watts Nikel	Yok	Yok	25
Akımsız Ni-P %9	Yok	Yok	17
Akımsız Ni-P %9	300	570	10
Akımsız Ni-P %9	500	930	6
Akımsız Ni-P %9	650	1200	4
Akımsız Ni-B %5	Yok	Yok	9
Akımsız Ni-B %5	400	750	3
Sert Krom	Yok	Yok	2

3.10. Korozyon

Akımsız Ni-P kaplama, kaplandığı yüzeyi dış etkilerden koruyan kalkan görevi görmektedir. Korozyon dayanımının çok iyi olması amorf yapısı ve pasifliğinden kaynaklanır. Tane veya faz sınırları olmadığından ve oluşan camsı yapı amorf özellik gösterdiğinden malzeme yüzeylerini pasifleştirmektedir. Kendilerine eşdeğer çok kristalli malzemelere göre farklı kimyasal ortamlara karşı daha dirençlidir. Fosfor oranının artmasıyla kaplamanın amorf özelliğinin ve pasifliğinin artması korozyon direncini artırmaktadır. Fosfor içeriği %10'dan fazla olan alaşımlar daha az miktarda fosfor içerenlere göre korozyona daha dayanıklıdır (Riedel, W., 1991). Kaplamada fosfor içeriği arttığında nötr ve asidik ortamlara karşı direnç artar. Bazı koroziyon ortamları için bu durumun tersi geçerlidir.

Özden, R.C., 2015' de yaptığı çalışmada; Ni-P kaplamaların yüzey karakteristiğinin belirlenmesinde en önemli bileşenin fosfor elementi olduğunu belirtmiş, ağırlıkça %10'dan fazla fosfor içeren yapıların yüksek amorf özellik gösterdiği ve bu kaplamaların korozyon direncinin tanımlanmasında temel bileşen olduğunu gözlemlemiştir.

3.11. Fiziksel Özellikler

Akımsız nikel kaplamaların yoğunluğu fosfor içeriği ile ters orantılıdır. Yoğunluk düşük fosforlu kaplamalarda $8,5 \text{ gr/ cm}^3$ iken %10-11 fosfor içerenlerde $7,75 \text{ gr/ cm}^3$ civarındadır.

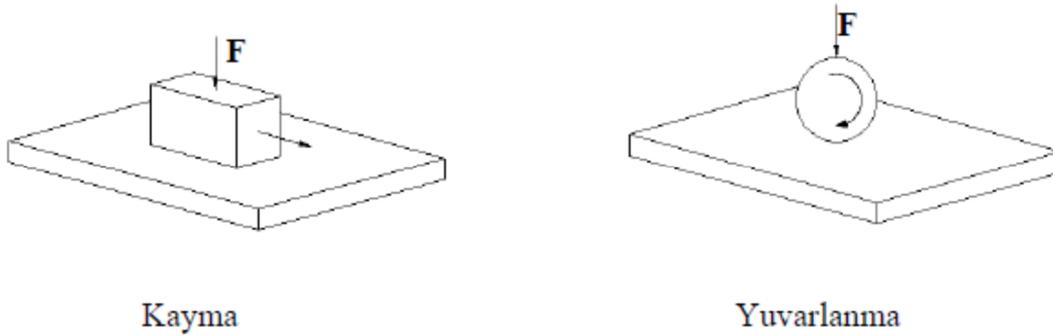
İletkenlikleri bakır veya gümüş gibi geleneksel iletkenlere göre düşüktür. Geleneksel kaplamaların elektriksel direnci ve ısı iletkenliği yaklaşık olarak $50-90 \mu\Omega.\text{cm}$ ve $0,010-0,013 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ 'dir. Isıl işlemler fosforun alaşımında çökmesini sağlar ve kaplamaların iletkenliği 3-4 kat artırılabilir (Kaya, B., 2007).

Fosfor içeriğinin akımsız nikel kaplamanın ısıl genişmesinde de etkisi vardır. Yüksek fosfor içeren kaplamalarda ısıl genişleme katsayısı yaklaşık olarak çeliğe eşdeğerdir. Fosfor içeriği %10'dan fazla olan kaplamalar manyetik değildir. $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde yapılan ısıl işlemler akımsız nikel kaplamanın manyetik etkisini geliştirirken, düşük fosforlu kaplamalarda az da olsa manyetik hassasiyet mevcuttur (Danvand, N., 2002).

4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

4.1. Sürtünme

Cisimlerin hareket halinde temas ettikleri yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklanan ve hareket eksenine zıt yönde ortaya çıkan kuvvete sürtünme kuvveti denir. Bir zemin üzerinde bulunan bir cismi harekete geçirmek için, cismin hareket yönünün zıt yönünde sürtünme kuvvetinden daha büyük bir kuvvet uygulamak gerekir. Uygulanan kuvvet cismin sürtünme kuvvetine eşit ya da daha küçükse cisim harekete geçmez (Şafak, H.E., 2008). Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma ve kayma-yuvarlanma meydana gelebilir. Şekil 4.1.'de birbirine temas eden cisimlerin kayma ve yuvarlanma hareketi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Birbirine temas eden cisimlerin kayma ve yuvarlanma hareketi.

Sürtünme, yüzey topoğrafyasıyla birlikte sunulan yüzey filmleriyle ve yağ ile çalışabilen aşınma mekanizmalarıyla doğrudan ilgilidir. Malzeme yüzeylerinin birbirleriyle teması sonucunda ortaya çıkan ısı, yağlayıcıların performansını etkileyebilir, yüzey filmlerinin özelliklerini değiştirebilir ve bazı durumlarda işlemden geçirilen ürünün özelliklerini değiştirebilir. Sürtünme ısısının bu sonuçları yapısal zayıflama, aşınma, yanma ve patlama sebebiyle parçaların mekanik hasar tehlikelerinden dolayı birçok güvenlik problemine sebep olabilir (Kenan, H., 2015).

Bir malzemeye gözle bakıldığında yüzeyi ne kadar düzgün gözüktüyse de mikroskobik girinti ve çıkıntılara sahip olması kaçınılmazdır. İki malzemenin yüzeyleri arasındaki temas her iki yüzeyin tepe noktaları arasında gerçekleşir. Gerçek temas alanı görüldüğünden çok daha küçük olur. Bahse konu bu temas alanlarına uygulanan yükten dolayı bu noktalarda yapışma ve bölgesel kaynaklar oluşur. Malzemeler birbiri üzerinde hareket etmeye başladığında öncelikle bu bölgesel kaynaklarda kopma meydana gelecektir. Bu nedenle cisimlerin yüzey pürüzlülüğü ne kadar fazla ise sürtünme kuvveti de o derece fazla olacaktır (Şafak, H.E., 2008).

4.1.1. Kayma sürtünmesi

Kayma sürtünmesi birbirine temas eden veya birbiri üzerinde kayan iki yüzey arasında ortaya çıkmaktadır. Gerçek temas alanı görünür temas alanının 0,01 ila 0,1'i kadardır. Gerçek temas mikroskobik olarak görünen küçük pürüz tepeliklerinde gerçekleşir.

Kayma esnasında teğetsel kuvvet arttığında, temas noktalarındaki etkileşim noktaları kaymaya başlar. Tüm bu yerlerin kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, bu yerlerdeki malzemenin gerilmesi ile orantılı olarak değişecektir.

$$F_s = A_r \cdot S \quad (4.1)$$

F_s : Sürtünme kuvveti.

A_r : Gerçek temas alanı.

S : Malzemenin kesme gerilmesi.

Ayrıca kayma sürtünmesi nem, ortam sıcaklığı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

4.1.2. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yüklü bir kürenin veya silindirin düz bir kütle üzerinde yuvarlanması sonucu oluşmaktadır. Sürtünme direnci, yük altındaki silindirin yuvarlanmasında silindirin merkezine uygulanır.

$$F_r = k.W^n/D^m \quad (4.2)$$

F_r : Yuvarlanma sırasında sürtünme direnci.

k : Malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit.

W : Yük.

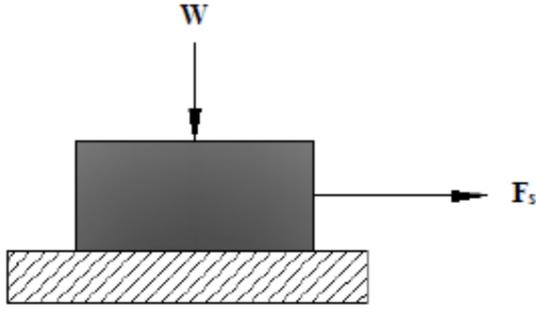
D : Silindir veya kürenin çapı.

N ve m : Deneysel sabitlerdir.

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme kuru, sıvı ve sınır sürtünmesi olarak üç halde incelenir (Demiral, M., 2005).

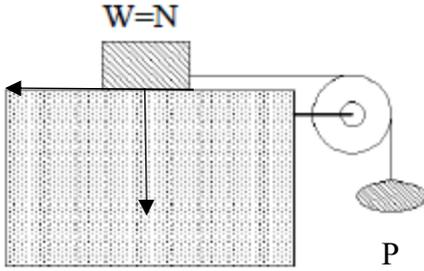
4.1.3. Sürtünme katsayısı

İki katı cisim birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, bu cisimlerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete (W) dik yönde bir sürtünme kuvveti (F_s) ortaya çıkar (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Sürtünme kuvvetini oluşturan kuvvetler.

Sürtünme katsayısının ölçümü için kullanılan düzeneklerden bir tanesi makaralı sistemdir (Şekil 4.3.). Bu sistemde sürtünme katsayısı ölçümünde kayma hareketini başlatmak için sürtünme kuvveti (F_s) ve normal kuvvet (W) bulunur. Kayma başlayıncaya kadar (F) kuvveti artırılarak kayma başladığı andaki uygulanan kuvvet sürtünme kuvveti (F_s) olarak tespit edilir.



Şekil 4.3. Makara sisteminde sürtünme kuvvetinin ölçülmesi.

Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden kuvvet N arasında;

$$F_s = N \cdot \mu_s \quad (4.3)$$

Bağlantısı vardır. Burada μ_s statik sürtünme katsayısıdır.

Sürekli kayma durumunda, kayma hareketini başlatmak için uygulanan F_s kuvveti artırılır ve kayma hareketi sürekli olmaya başladığı andaki F kuvveti F_k olarak belirlenir.

$$F_k = N \cdot \mu_k \quad (4.4)$$

Bağlantısı yazılabilir. Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır.

4.2. Aşınma

Sürtünme ve aşınma bir yüzeyin başka bir yüzeye temasıyla oluşan, yüzeylerin mekanik etkisi ve birbiri üzerindeki hareketi sonucu meydana gelen karmaşık ve mikroskobik bir etkileşimdir. Bu etkileşim sonucu oluşan malzeme yüzeylerinin geometrik ve topoğrafik karakteristikleri, her iki yüzeye etki eden kuvvetler, sıcaklık, kayma hızı, yüzeylerin durumları (ıslak, kuru) ve atmosferin şartları gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Axén, N.H.S. vd., 2001). Aşınma; sürtünmenin neden olduğu mekanik bir etki ile malzemenin üst katmanından başlayan pul pul dökülmelere verilen isimdir. Sürtünme ve aşınma enerji kaybının temel sebebidir (Amiri, M. ve Khonsari, M., 2010).

Aşınma temas eden yüzeylerde sistemin bir yanıtı olarak ortaya çıkar. Malzemenin çalışma şartları aşınma gösteren yüzeyi doğrudan etkiler. Aşınma esnasında bir ya da iki katı yüzeyde kayma, dökme ve darbe etkisiyle hasar meydana gelir. Sürtünme ve aşınma arasında doğrudan korelasyon yoktur. Yüksek sürtünme gösteren yüzeylerde yüksek aşınma değeri görüleceği tamamıyla doğru bir yaklaşım olmaz. Örnek olarak polimer benzeri ara yüzler yüksek sürtünme ortamlarında düşük aşınmaya neden olabilir ya da seramik ara yüzlerde düşük sürtünmeye karşılık yüksek aşınma gelişebilir. Aşınma her zaman istenmeyen bir hasar değildir. Torna, frezelerle üretilen talaşlı imalat parçalarının aşınması istenirken rulman, dişli gibi yük-hareket elemanlarında aşınma arzu edilmez (Bhushan, B., 2013).

Aşınmaya etki eden unsurlar aşağıdaki gibidir (Boyer, R.G., 2002);

1. Temas halindeki malzemelerin türü,
2. Malzemenin geometrik parametreleri (Boyutu, şekli vb.),
3. Bağlı hareket,
4. Yükleme durumu,
5. Yağlama durumu,
6. Çevre şartları (Sıcaklık, nem vb.).

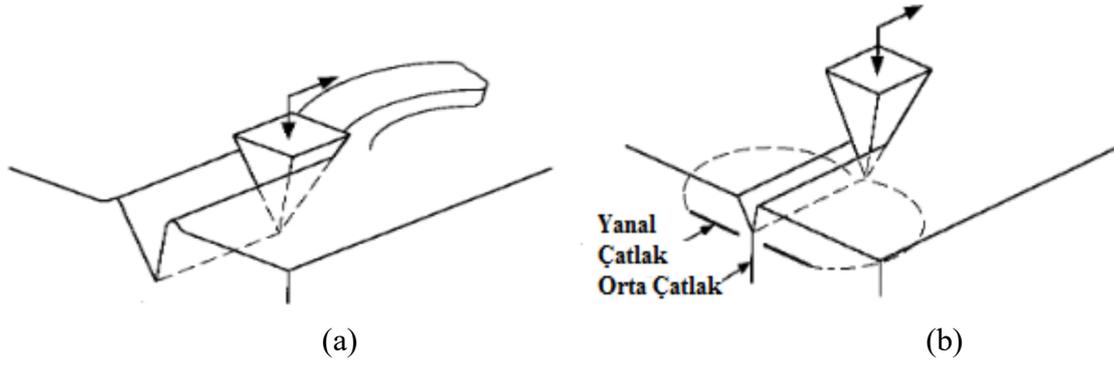
Aşınmanın azaltılması için dikkat edilmesi gereken bazı kriterler ise şöyledir;

1. Temas basıncının düşük tutulması,
2. Kayma hızının düşük tutulması,
3. Az pürüzlü yataklama yüzeylerinin seçilmesi,
4. Yüksek sıcaklıklardan kaçınılması,
5. Sert malzemelerin kullanılması,
6. Yağlayıcı kullanılması.

Aşınma farklı fiziksel ve kimyasal değişikliklerin sonucunda ortaya çıktığından sadece bir aşınma değil aşınma mekanizmaları vardır. Bunlar abrasif aşınma, adhezif aşınma, erozyon aşınması, yorulma aşınması, mekanik korozyon olarak sıralanabilir. Bu sınıflandırma yapılır iken yüzeylere uygulanan yük, aşındırıcı parçacığı boyutu ve türü, temas şekli ve geometrisi gibi etkenler de dikkate alınmıştır.

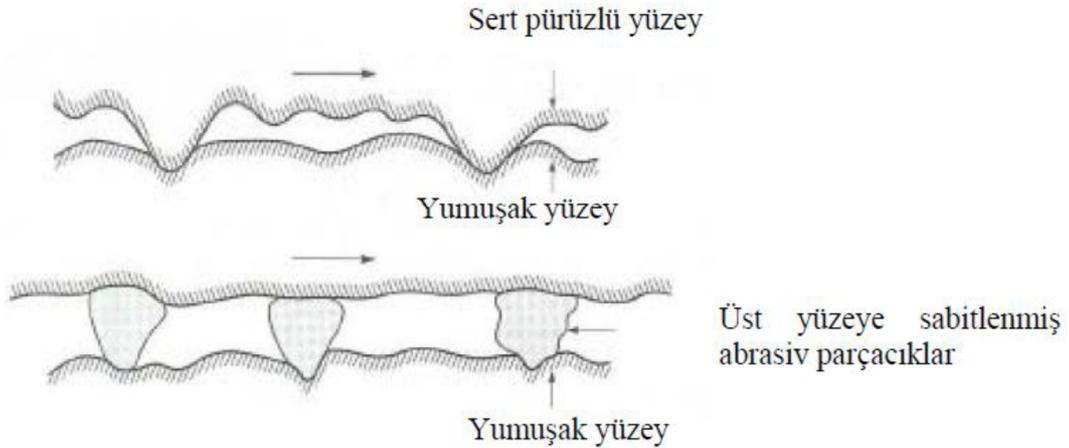
4.2.1. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, katı bir yüzey boyunca mevcut malzemedan daha sert parçacıklar ve sert çıkıntıların yaptığı sürtünme nedeniyle oluşan aşınmadır. Aşınma sırasında temas eden yüzeylerin hareketleri arttıkça aşınan malzeme miktarı da artış gösterir (Tylczak, J.H. vd., 1992). Sert keskin bir aşındırıcının sünek düzgün bir yüzeyde kuvvet uygulanarak hareket ettirilmesi sonucu yüzeyde oluk ya da pullanma şeklinde malzeme kaybı olur. Gevrek bir malzemedan ise çatlak oluşumuna neden olan kırılmalara yol açar. Şekil 4.4.'de her iki malzeme için oluşan aşınma bölgeleri gösterilmiştir (Kato, K. ve Adachi, K., 2001).

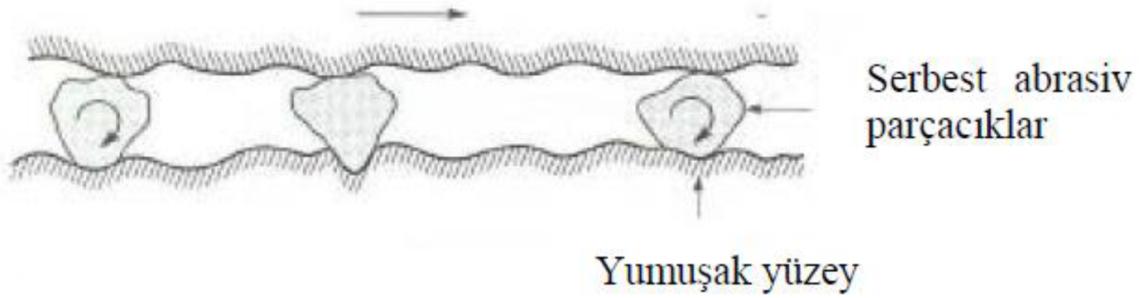


Şekil 4.4. Gevrek ve sünek malzemelerde oluşan aşınma bölgeleri a) sünek bir malzemenin b) gevrek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması (Kato, K. ve Adachi, K., 2001).

Abrasif aşınma için iki genel durum vardır. Birinci durumda, Şekil 4.5.'de gösterilen, sert yüzey, iki sürtünen yüzeyin daha sert olanıdır (İki cisimli abrasyon). Bu duruma örnekler öğütme kesme ve talaşlı imalat gibi makine çalışmalarıdır. İkinci durumda, Şekil 4.6.'da gösterilen, sert yüzey, üçüncü bir cisimdir ve genellikle küçük abrasif partiküllerdir, diğer iki yüzey arasında bulunur ve yüzeylerden birini veya ikisini de aşındırabilir (üç cisimli abrasyon). Buradaki aşındırıcı parçacıklara sert abrasif parçacıklarda denir. Bu tür aşınmalara örnek serbest abrasif alıştırma ve parlatmadır. Birçok durumda başlangıçta aşınma mekanizması adheziftir. Adhezif aşınmada aşınma partikülleri oluşur, bu partiküller ara yüzeyde sıkışır ve üç cisimli abrasif aşınmaya neden olur (Çelikyürek, İ., 2006).



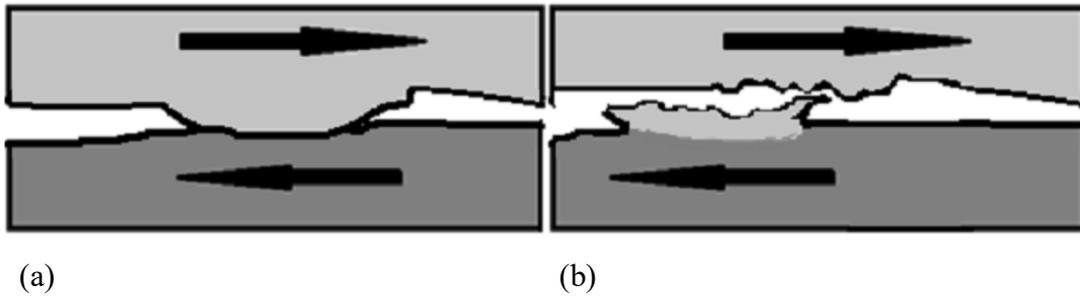
Şekil 4.5. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması (Çelikyürek, İ., 2006).



Şekil 4.6. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması (Çelikyürek, İ., 2006).

4.2.2. Adhesif aşınma

Katı iki malzemenin yüzeylerinin birbiri üzerinde kayma ya da haddelemesi sonucundan adhesif (yapışma) aşınma meydana gelmektedir. Yerel yükselti noktalarının iki malzemeye temas etmesiyle atomların birbiriyle bağ ilişkisi sonucu bu aşınma oluşur. Temas noktalarındaki kayma hareketi sonucunda plastik deformasyonla birlikte yüzeyde hasar meydana gelir. Adhesif aşınma Şekil 4.7.' de gösterilmiştir (Tylczak, J.H. vd., 1992).



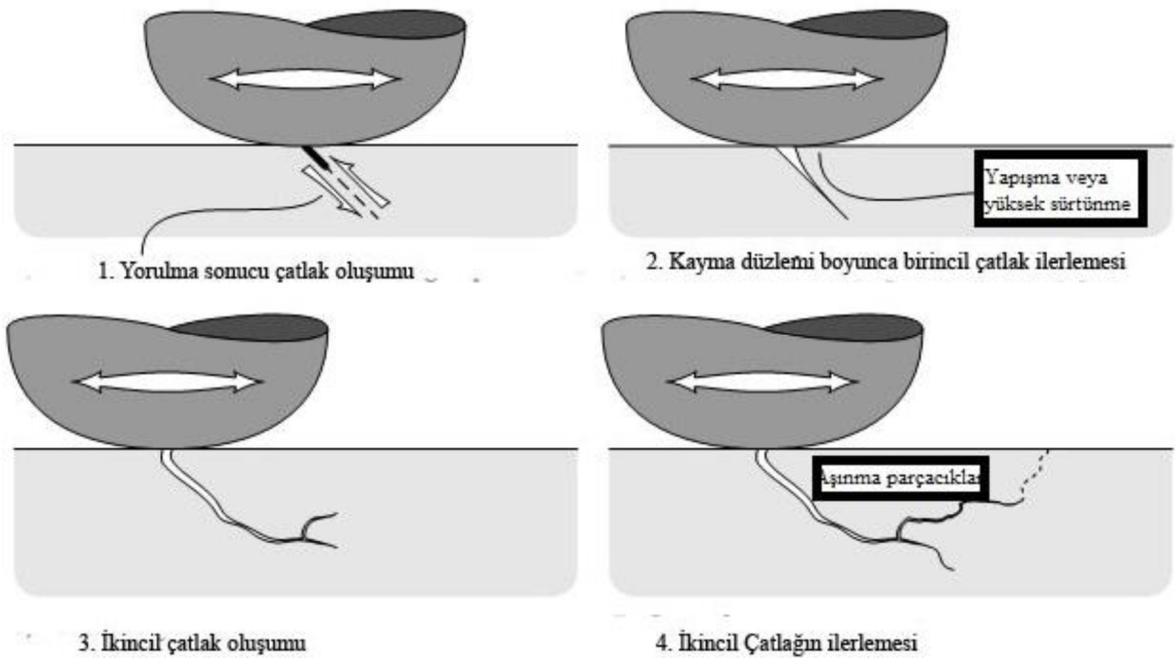
Şekil 4.7. Adhesif Aşınma a) kaymaya başlamadan önce yüzeylerin birbiriyle yapışması b) kayma sonrası yüzeyde oluşan yapışmadan sonra meydana gelen plastik deformasyon sonucunda malzeme kaybı (Tylczak, J.H. vd., 1992).

Adhesif aşınmayı azaltan faktörler;

1. Düşük yük,
2. Sert malzemeler,
3. Kirli sürtünme yüzeyleri,
4. Katı yağlayıcılardır.

4.2.3. Yorulma aşınması

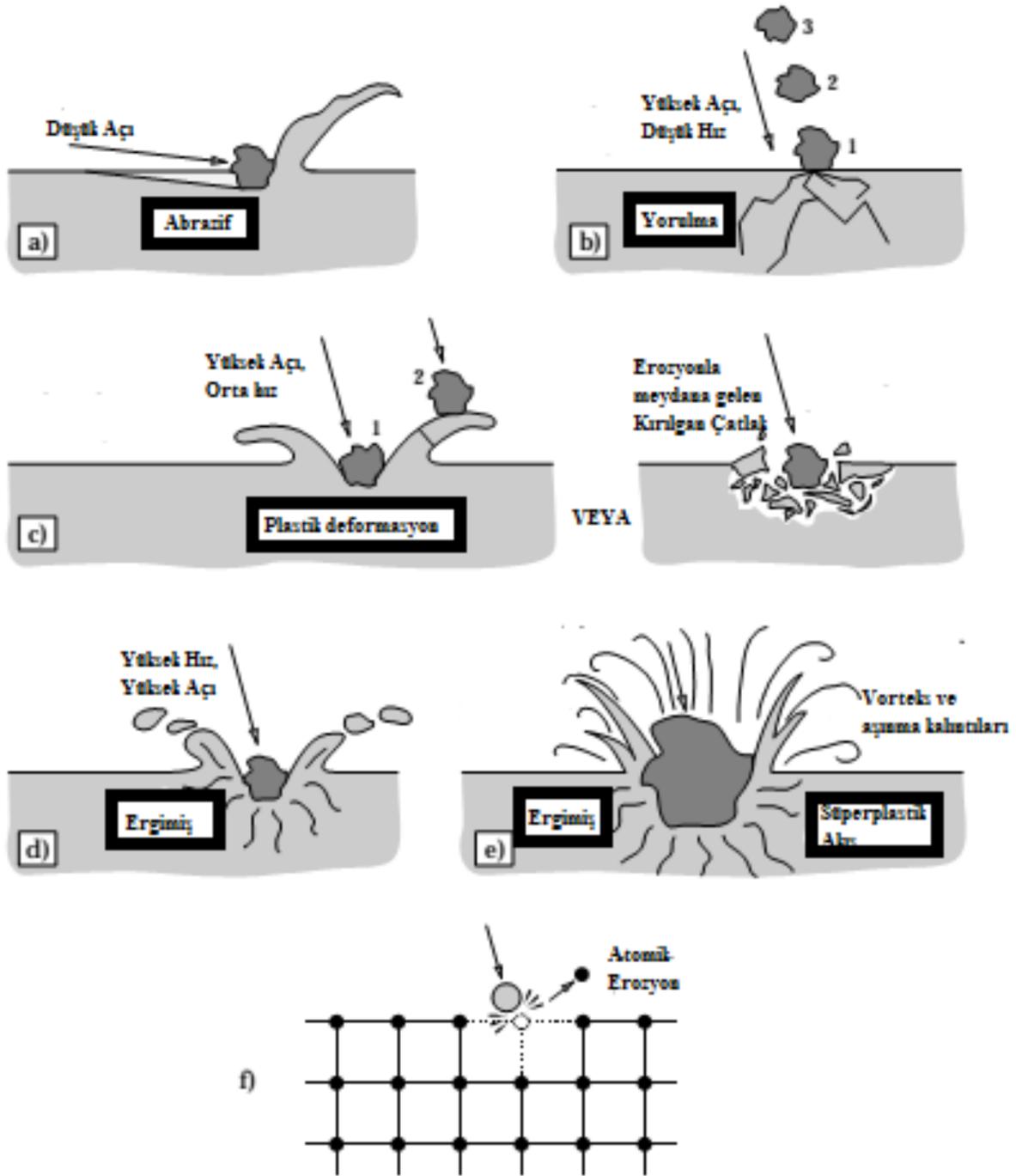
Temas halinde bulunan yüzeylerde, tekrarlanan kayma veya yuvarlanma nedeniyle yorulma kırılması meydana gelmektedir. Yükleme ve boşalmalara maruz kalan malzeme bölgesinde çatlaklar meydana gelmektedir. Yorulma sonucu oluşan çatlakların şeması Şekil 4.8.' de gösterilmiştir (Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., 2013).



Şekil 4.8. Belirli bir çevrim altındaki yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları (Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., 2013).

4.2.4. Eroziv aşınma

Katı parçacık erozyonu, ufak katı parçacıkların tekrarlı etkisinden meydana gelen yüzey malzemesi kaybıdır. Bazı durumlarda katı parçacık erozyonu tercih edilen bir işlemdir. Kumlama ve yüksek hızlı abrasif su jeti kesme gibi durumlarda katı parçacık erozyonundan faydalanılır. Fakat birçok mühendislik sisteminde ciddi bir problem olarak düşünülür. Buhar ve jet türbinleri, boru hatları, partikül madde taşıyıcı valfler gibi sistemlerde istenmeyen bir durum olarak ele alınır. Eroziv aşınma mekanizmaları Şekil 4.9.' da gösterilmiştir.

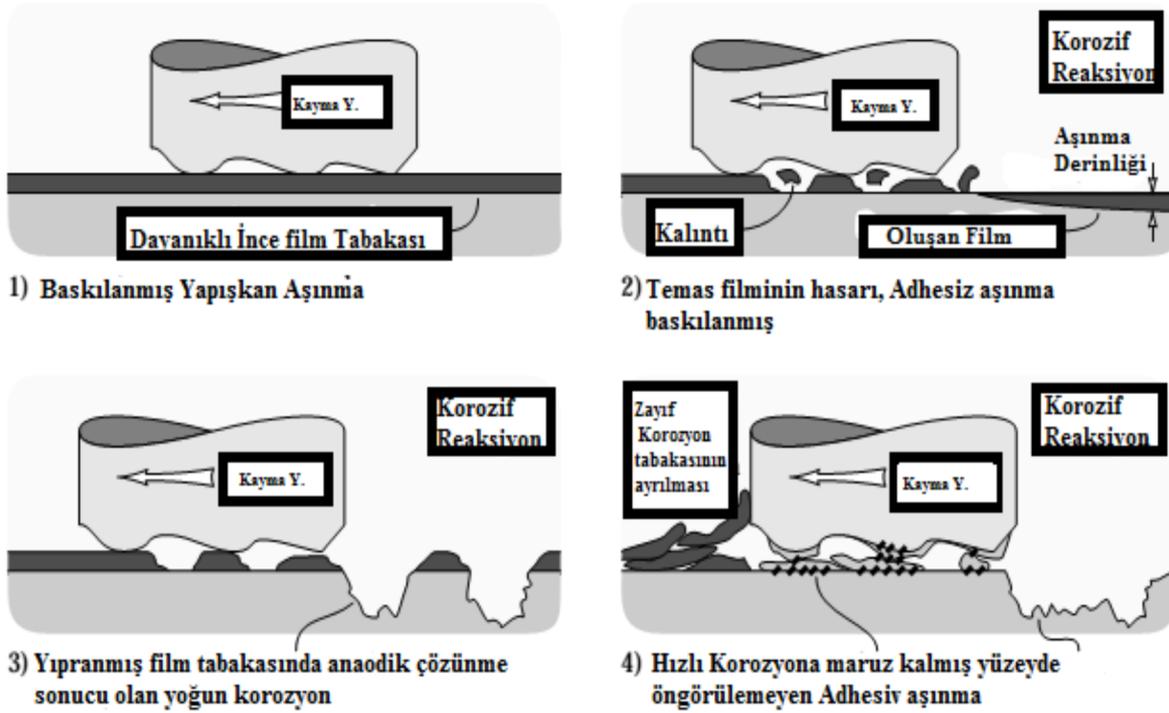


Şekil 4.9. Erozif aşınma mekanizmaları (Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., 2013).

4.2.5. Koroziif aşınma

Koroziif aşınma, aşınmaya uğrayan yüzeylerde kimyasal reaksiyonlar meydana gelmesiyle oluşan malzeme kaybına denir. Kimyasal korozyon kayma düzleminde kimyasal ve aşındırıcı bir ortamda meydana gelir. En baskın koroziif ortam oksijendir. Korozyon ilk başta yüzeyde ince bir film oluşturarak malzeme kaybını azaltıcı etki yapar. Ancak daha

sonrasında yüzeydeki kayma gerilimleri ile birlikte çok fazla malzeme kaybı olur (Bhushan, 2013). Korozif aşınma Şekil 4.10.' da gösterilmiştir.



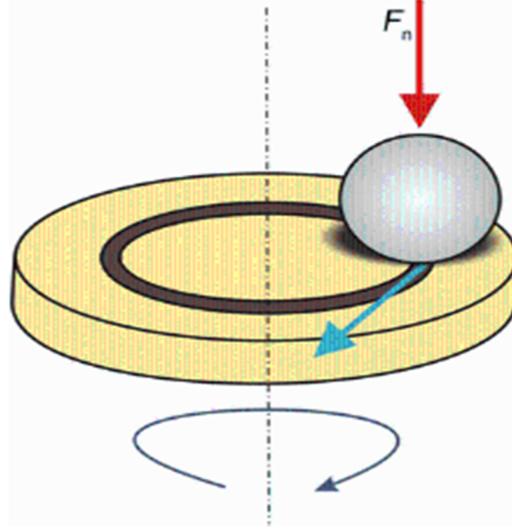
Şekil 4.10. Korozif bir malzeme ile aşınmış yüzey arasındaki etkileşimler (Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., 2013).

4.3. Deneysel Aşınma Metotları

Malzemelerin aşınma davranışlarının laboratuvar ortamında incelenmesinde çeşitli aşınma yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar, Pin On Flat, Pin On Disk, Pin On Drum, ve Ball On Disk yöntemidir. Levha Üzerine Bilye (Ball on disk) yönteminin bu yöntemler içinde daha sağlıklı sonuçlar verdiği düşünülerek bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

4.3.1. Levha üzerine bilye (ball on disk) yöntemi

Numune dönmekte iken sabitlenmiş bir aşındırıcı ucun, malzeme yüzeyine sabit bir yük altında teması sonucu yüzeydeki sürtünme kuvvetinin hesaplanması temeline dayanır. Malzemeye belirli devir ve uzunlukta sürtünme uygulayarak profilometre ile aşınma derinlikleri saptanabilir. Şekil 4.11.' de levha üzerine bilye yönteminin numune ve aşındırıcı bilye ile etkileşimi gösterilmiştir.



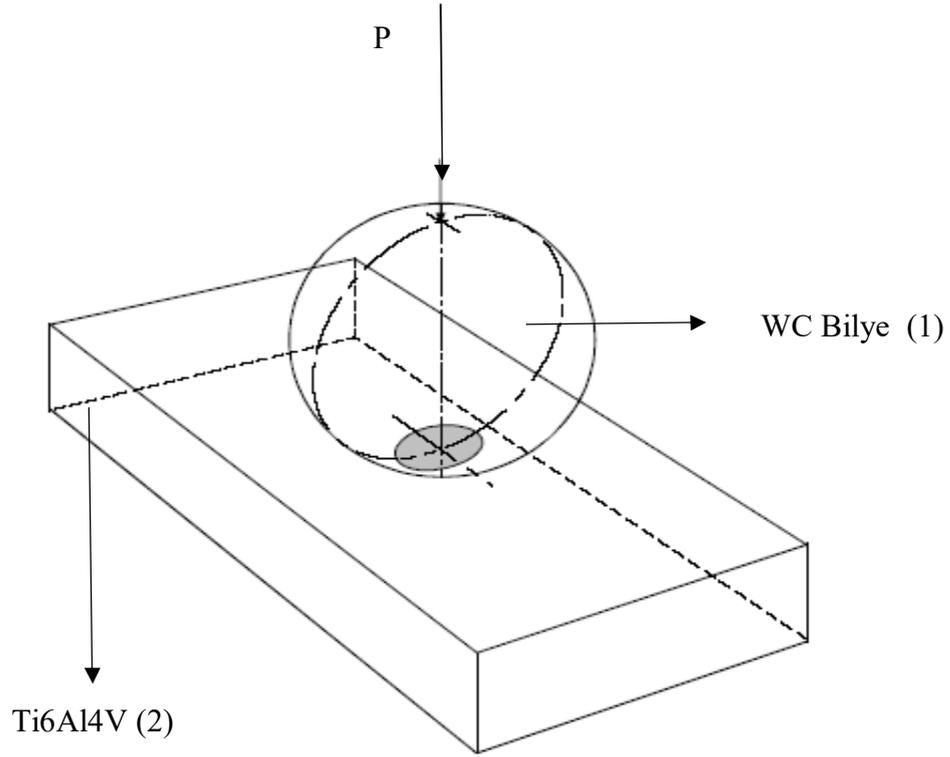
Şekil 4.11. Levha üzerine bilye aşınma testinin şematik gösterimi (Pigiel, F. vd., 2008).

4.3.2. Hertz temas teorisi

Birbiri ile etkileşim halindeki iki temas yüzeyi arasında meydana gelen basınçlar ve deformasyonlar Hertz teorisine göre hesaplanır. Bu teori aşağıda belirtilen kabulleri yapmaktadır.

1. Temas yüzeyinin boyutları temas eden parçaların diğer boyutlarına oranla oldukça küçüktür.
2. Deformasyonlar, malzemelerin elastiklik sınırları içindedir.
3. Gerilme ve şekil değiştirmeler için Hooke kanunu geçerlidir.
4. Temas yüzeylerinde kayma gerilmesi yoktur.

Levha üzerine bilye yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen aşınma deneyinde temas alanı Şekil 4.12.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Levha üzerine bilye yönteminde temas alanı.

Levha üzerinde bilye yönteminde P yükü ile levha üzerinde dönmekte olan bilyede dairesel temas noktasındaki Maximum Temas Basıncı $p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2}$ bağlantısı ile hesaplanır.

Denklemdaki a değeri temas boyutu olup, $a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4E^*}}$ bağlantısı ile bulunur. P uygulanan kuvveti, R Eşdeğer eğrilik yarıçapını ve E^* eşdeğer elastisite modülünü göstermektedir.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{Levha için } R_2 = \infty \text{ kabul edilir.})$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (E_1, E_2: \text{Malzemelerin elastisite modülü,}$$

$$\nu_1, \nu_2: \text{Malzemelerin poisson oranı.)}$$

Hesaplanan Maximum Temas Basıncıları Bölüm 6.1' de verilmiştir.

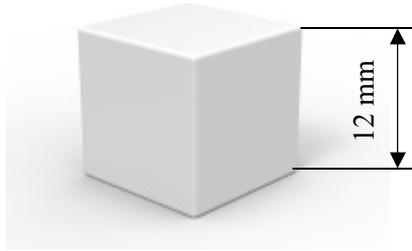
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın ilk bölümünde Ti-6Al-4V alaşımının üzerine akımsız olarak orta düzeyde Ni-P kaplama uygulanmıştır. Elde edilen numuneler mikroyapısal olarak karakterize edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise uygulanan akımsız kaplamanın Ti-6Al-4V alaşımının tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir.

5.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada piyasadan tedarik edilen Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan küp profilli numuneler şematik olarak Şekil 5.1.' de gösterilmiştir.



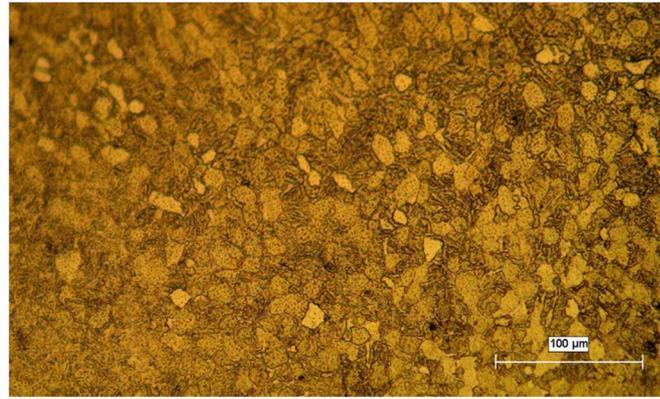
Şekil 5.1. Numunelerin şematik olarak gösterimi.

5.2. Numune Hazırlama

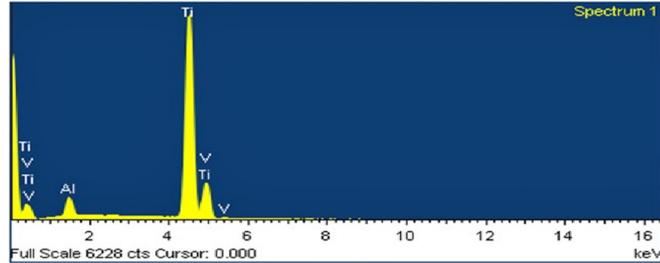
Akımsız nikel kaplama (Ni-P) deney numunelerinin hazırlanması için; temin edilen Ti-6Al-4V alaşımı 12x12x12 mm³ boyutlarında küp profilli kesilerek hazırlanmıştır. Numunelere ait resimler Şekil 5.2.' de, mikroyapısı ve EDS analizi Şekil 5.3.' te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Akımsız kaplama deneyinde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı numuneler.



(a)



Element	Weight%	Atomic%
Al K	5.68	9.68
Ti K	89.82	86.26
V K	4.50	4.06
Totals	100.00	

(b)

Şekil 5.3. Ti-6Al-4V alaşımı numunelerin a) mikroyapısı ve b) EDS analizi.

Yüzey hazırlama kaplama işlemi öncesinde kaplama kalitesine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Özellikle kaplama öncesinde yüzeyde nüfuz etmiş kalıntıların giderilmesi gerekmektedir. Akımsız nikel kaplama öncesinde numuneler Çizelge 5.1.'de gösterilen işlem basamaklarında gösterilen şekilde temizlenmiştir.

Çizelge 5.1. Akımsız kaplama ön işlemleri.

İşlem Sırası	Yapılan İşlem	Amaç	Süre
1	Solvent buharında yağ alma prosesine göre parçaların yağının giderilmesi.	Temizleme	10 sn.
2	Numunelerin oda sıcaklığında su ile yıkanması.	Temizleme	15-60 sn.
3	Numunelerin hidroklorik asit temizleme çözeltisinde temizlenmesi.	Temizleme	15-60sn.
4	Numunelerin oda sıcaklığında su ile yıkanması.	Temizleme	15-60 sn.

5.3. Akımsız Kaplama Deneyi

Ön temizleme işlemi gerçekleştirilen Ti-6Al-4V alaşımı üzerine %7-8 fosfor içeren (orta düzeyde) Ni-P kaplama uygulanmıştır (Şekil 5.4.). Bu kaplamanın özelliği orta seviyede korozyon direnci, yüksek sertlik, hızlı kaplama ve parlak görünüm özelliklerine sahip olmasıdır.



Şekil 5.4. Hazırlanmış Ni-P banyosu ve kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numuneler.

Akımsız nikel banyosunun genel bileşimi ve çalışma tablosu Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Akımsız nikel kaplama genel bileşimi ve çalışma tablosu.

	Bazik			Asidik		
	Banyo1	Banyo2	Banyo3	Banyo4	Banyo5	Banyo6
Banyo Bileşenleri						
Nikel Klor, g/L	45	30	30	...	...	...
Nikel Sülfat, g/L	...	...	...	21	34	45
Sodyum hipofosfit, g/L	11	10	10	24	35	10
Amonyum klor, g/L	50	50	...	...	...	...
Sodyum sitrit, g/L	100	...	...	...	...	...
Amonyum sitrit, g/L	...	65	...	...	...	...
Amonyum hidroksit, g/L	pH'e göre	pH'e göre	pH'e göre	pH'e göre	pH'e göre	pH'e göre
Laktik asit, g/L	...	...	...	28	...	...
Malik asit, g/L	...	...	...	...	35	...
Amino-asetik asit, g/L	...	...	...	...	...	40
Sodyum hidrooksiasit, g/L	...	...	10	...	...	...
Propiyonik asit, g/L	...	...	...	2.2	...	...
Asetik asit, g/L	...	...	...	...	...	10
Suksin asit, g/L	...	...	...	...	10	...
Kurşun, ppm	...	...	...	1	...	...
Tiyöüre, ppm	...	...	...	...	1	...
Çalışma Şartları						
pH	8,5-10	8-10	4-6	4,3-4,6	4,5-5	4,5-5,5
Sıcaklık, °C	90-95	90-95	88-95	83-95	88-95	88-95
Kaplama kalınlığı, µm/sa	10	8	10	25	25	25

Ticari olarak bileşiminin içeriği tam olarak bilinmemekle birlikte orta düzeyde fosfor içeren akımsız nikel solüsyonu Enthone firmasından temin edilmiştir. Akımsız nikel kaplama banyosu Çizelge 5.3.'de belirtilen değerlere uygun olarak 2 lt'lik beherde 90-92 °C optimum sıcaklık ve % 4,7-5,2 pH değerinde hazırlanarak numuneler 1 saat süreyle

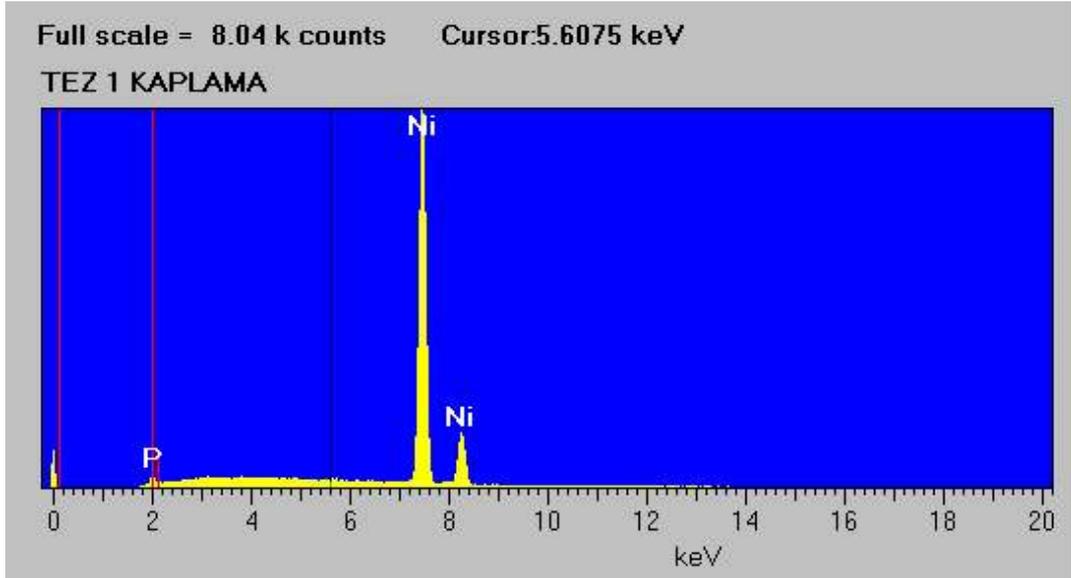
kaplanmıştır. Kaplama sonrasında numuneleri aşınma test cihazında kullanabilmek için soğuk kalıba alınmıştır.

Çizelge 5.3. Akımsız Ni-P kaplama banyo bileşenleri.

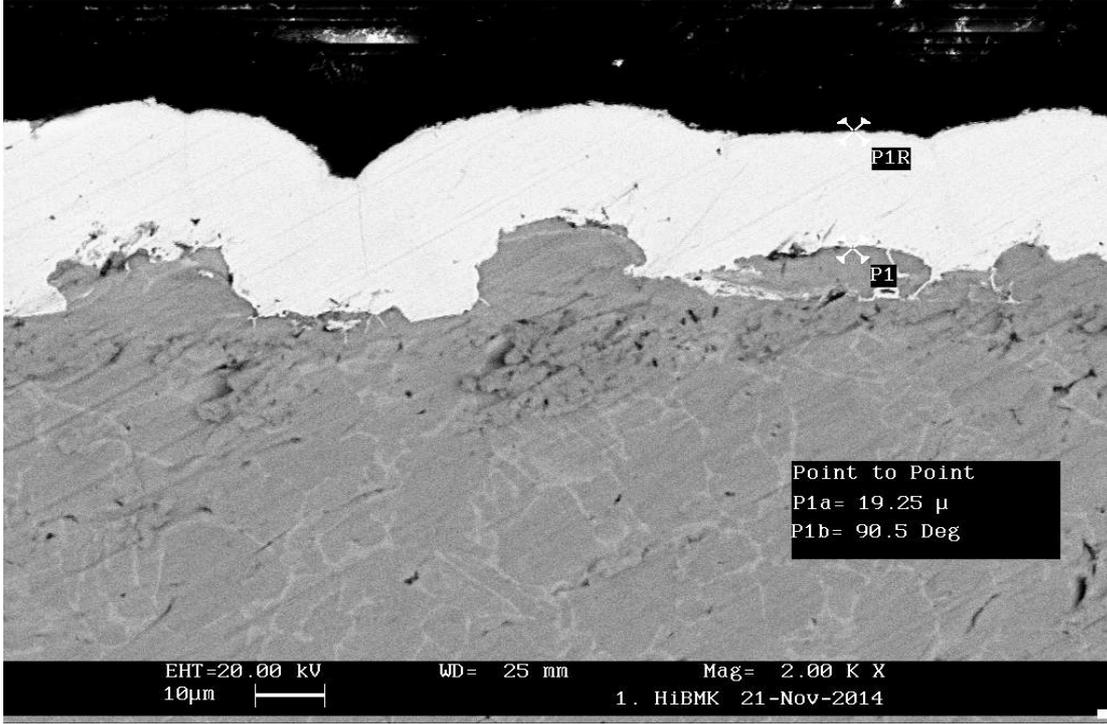
S/N	Kimyasal Madde	Konstrasyon
1.	Enthone 806A	65 ml/lt
2.	Enthone 806B	150 ml/lt

5.4. Kaplama Kalınlığı ve EDS Analizi

Kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımına ait EDS analizi Şekil 5.5.' de gösterilmiştir. Akımsız kaplamalarda yaklaşık 20 µm kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Kaplama kalınlığını gösteren SEM görüntüsü Şekil 5.6.' da gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Ni-P Kaplama EDS Analizi.



Şekil 5.6. Ni-P Kaplama SEM Görüntüsü.

5.5. Aşınma Testi

Aşınma deneylerinde CSM Tribometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.7.). Aşınma deneyi sonrasında kaplama yüzeyinde oluşan hacim kaybı miktarları Mitutoyo SJ-400 profilmetre cihazı ile ölçülen aşınma profilleri kullanılarak hesaplanmıştır. Profillere ait aşınma oranları InstrumX Versiyon 4.0 B yazılım kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7. Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği tribometre.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Akımsız Ni-P Kaplanan ve Kaplanmamış Numunelere Ait Deney Kodları

Ti-6Al-4V alaşımına farklı yük ve mesafede aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı uç olarak 3 mm çapında WC (Tungsten karbür) bilye kullanılmıştır. Akımsız Ni-P kaplanan numunelere ait deney kodları Çizelge 6.1.'de, kaplanmamış numunelere ait deney kodları ise Çizelge 6.2.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Ni-P kaplanmış numunelere ait deney kodları.

Test Parametreleri	Değer	
Uygulanan yük (N)	2	Ti64-1
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	40	
Çap (mm)	4	
Uygulanan yük (N)	2	Ti64-2
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	80	
Çap (mm)	4	
Maximum Temas Basıncı	1274,6 MPa	Ti64-1 ve Ti64-2
Uygulanan yük (N)	5	Ti64-3
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	80	
Çap (mm)	4	
Maximum Temas Basıncı	1730 MPa	

Çizelge 6.2. Kaplanmamış numunelere ait deney kodları.

Test Parametreleri	Değer	
Uygulanan yük (N)	2	Ti64-B
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	40	
Çap (mm)	4	
Uygulanan yük (N)	2	Ti64-A
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	80	
Çap (mm)	4	
Maximum Temas Basıncı	1274,6 MPa	Ti64-B ve Ti64-A
Uygulanan yük (N)	5	Ti64-C
Hız (ms^{-1})	2,5 cm/s	
Ortam	Açık Hava	
Nem (%)	35	
Sıcaklık (°C)	21	
Kayma Mesafesi (m)	80	
Çap (mm)	4	
Maximum Temas Basıncı	1730 MPa	

6.2. Ni-P Kaplanmış ve Kaplanmamış Numunelere Ait Aşınma Değerleri

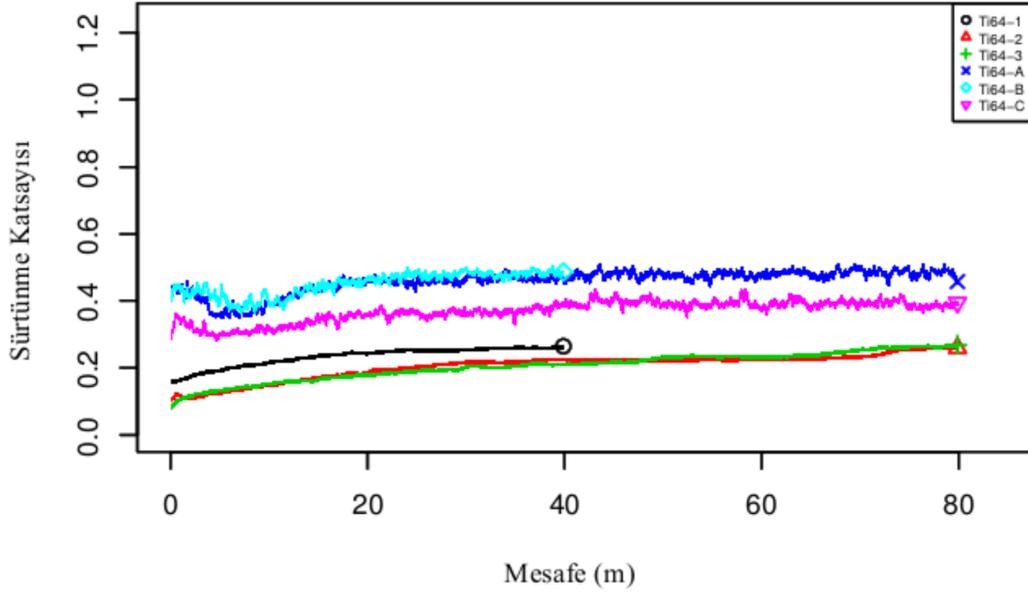
Aşınma hesapları veya mühendislik tasarımları malzemelerin elastisite modülü ve poisson oranına göre yapılmalıdır. Malzeme çiftleri gözetilerek yapılan bu hesaplamalar sonucunda alt metal ile aşındırıcı yüzey arasında Hertzian temas gerilmesi hesaplanmaktadır. Bu gerilmenin değerinin kaplama veya alt metalin dayanım değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir. Bu oluşan temas gerilmesi dayanım değerlerinin üzerinde olması durumunda kaplama çatlamaktadır ve alt metalle aşındırıcı yüzeyin teması sonucu alt metalde hasar meydana gelmektedir. Bu da kaplamanın karakterize edilmesini mümkün kılmamaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımı kaplamalı ve kaplamasız olarak yukarıda belirtilen deney şartlarında aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.3.'de aşınma deney sonuçları verilmiştir.

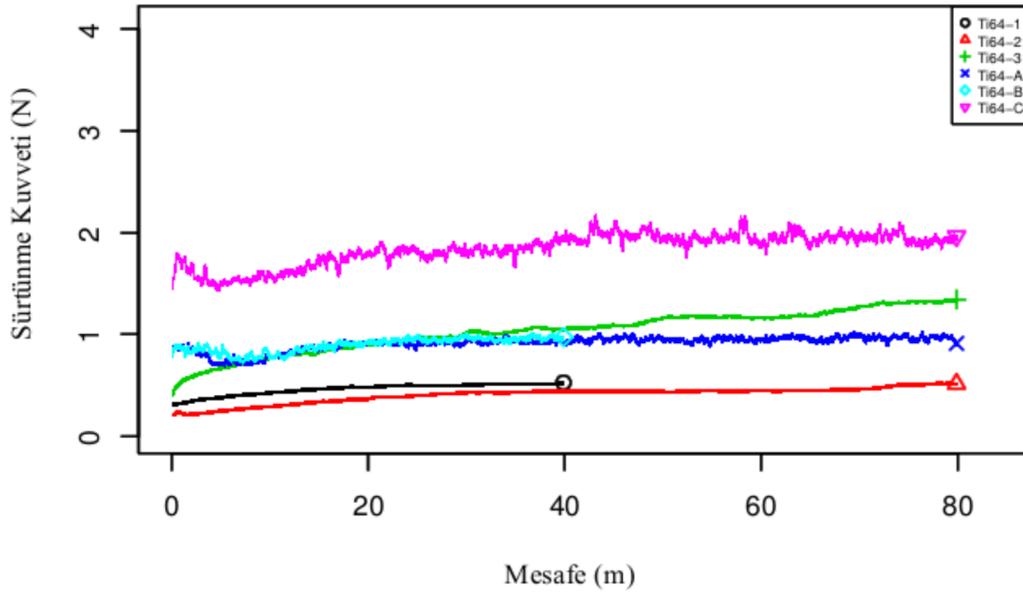
Çizelge 6.3. Aşınma deney sonuçları.

Numune	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	Spesifik Aşınma Oranı x 10^{-6} ($mm^3/N.m$)
Ti64-1	0,235	115,37
Ti64-2	0,207	131,50
Ti64-3	0,207	53,75
Ti64-A	0,459	164,31
Ti64-B	0,450	360
Ti64-C	0,370	100,97

Çizelge 6.3.'de görüldüğü gibi aynı şartlar altında aşınma testi yapılan Ti64-1 ve Ti64-B, Ti64-2 ve Ti64-A, Ti64-3 ile Ti64-C numuneleri değerlendirildiğinde ortalama sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerlerinin kaplanmış numunelerde daha düşük olduğu, kaplama işleminin malzemede yaklaşık % 45-50 oranında sürtünme katsayısında iyileşme sağladı görülmüştür. Şekil 6.1.' de numunelere ait sürtünme katsayısı-mesafe grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.2.' de numunelerin sürtünme kuvveti-mesafe grafiği verilmiştir.



Şekil 6.1. Sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.

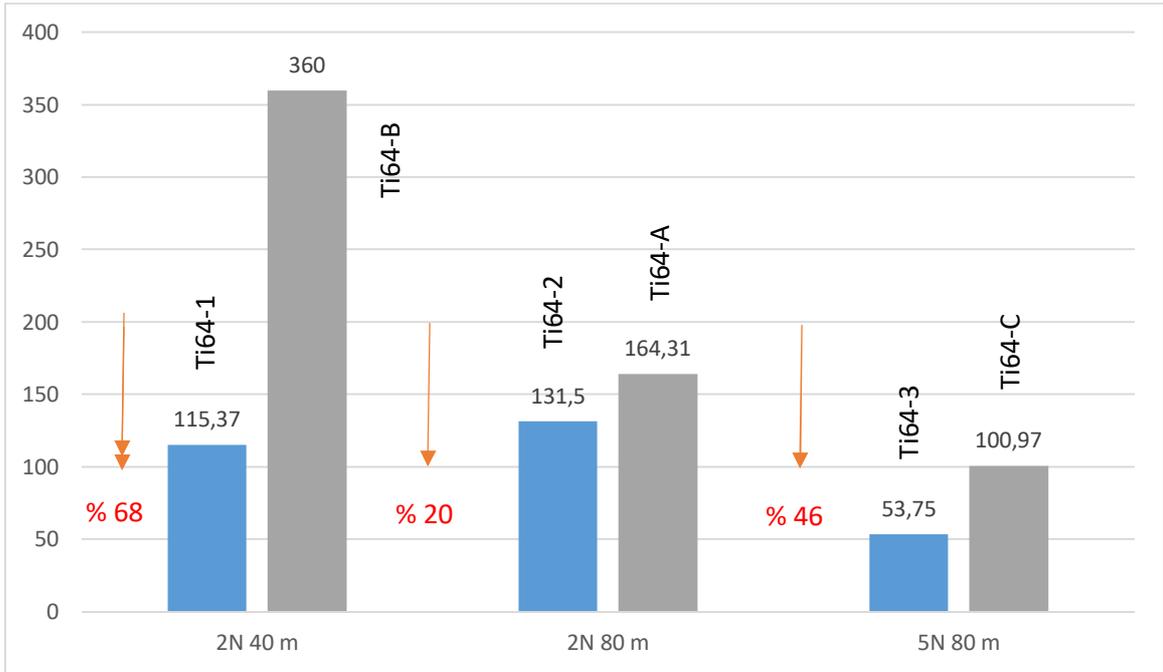


Şekil 6.2. Sürtünme kuvveti-mesafe grafiği.

Ni-P kaplanmış numuneler kaplanmamış numunelere göre daha az aşınmıştır. Kaplanmış numuneler düşük ortalama sürtünme katsayısı ve düşük aşınma göstermiştir. En yüksek aşınma miktarı 2N yük ve 40 m mesafede kaplanmamış numunede gerçekleşmiştir. Kaplanmamış numunedeki daha kısa mesafede gerçekleşen daha yüksek aşınma miktarı

yüzeyin derecesi ve yüzeyde oluşan oksit filminin kararlılığına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Kaplanmamış numunelerde artan yük ve mesafeye bağlı olarak aşınma miktarındaki azalma göze çarpmıştır. Bu durumun sebebi olarak; kırılan oksit tabakasının adhesif etkiyle yüzeye yapışması sonucu yüzeyde yağlayıcı görevi görmesiyle aşınmanın azalmasını sağladığı değerlendirilmiştir.

Kaplamanın aşınma direncine pozitif etki ettiği görülmüştür. Aşınma oranlarına ait grafik Şekil 6.3.'de gösterilmiştir. Aşınma oranı-sürtünme katsayısı ilişkisi incelendiğinde; doğru orantılı olarak sürtünme katsayısı yüksek olan numuneler düşük olan numunelere göre daha fazla aşınmıştır. Sadece bu sonuçlar değerlendirilerek sürtünme katsayısı ile aşınma oranı arasında orantı kurmak doğru bir yaklaşım olmaz.

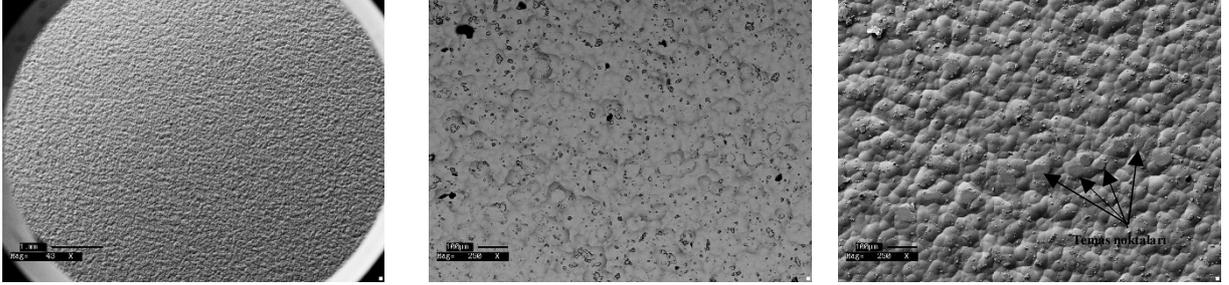


Şekil 6.3. Ni-P kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma oranları grafiği.

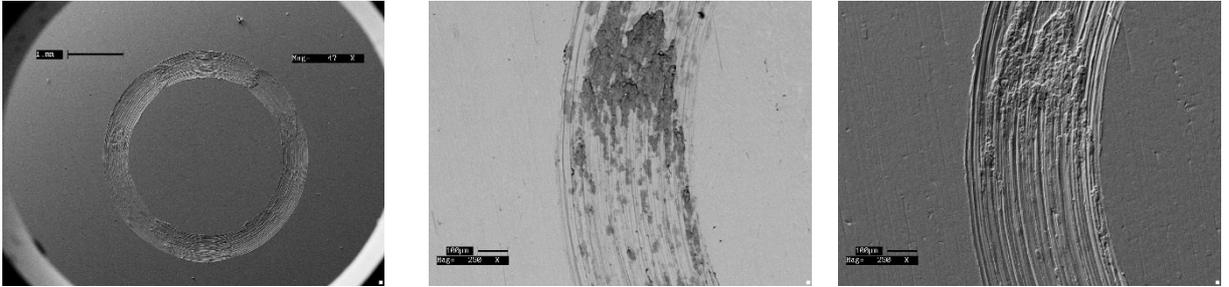
6.3. Ni-P Kaplanmış ve Kaplanmamış Numunelere Ait Aşınma Yüzeyi SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri

Ni-P kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri ve EDS analizleri bu bölümde verilmiştir. Aynı koşullarda aşınma deneyi gerçekleştirilen numunelerin görüntüleri bir arada gösterilmiştir.

2N yük ve 40 metre mesafede gerçekleştirilen aşınma testinde Ti64-1 ve Ti64-B numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 6.4.'de verilmiştir.



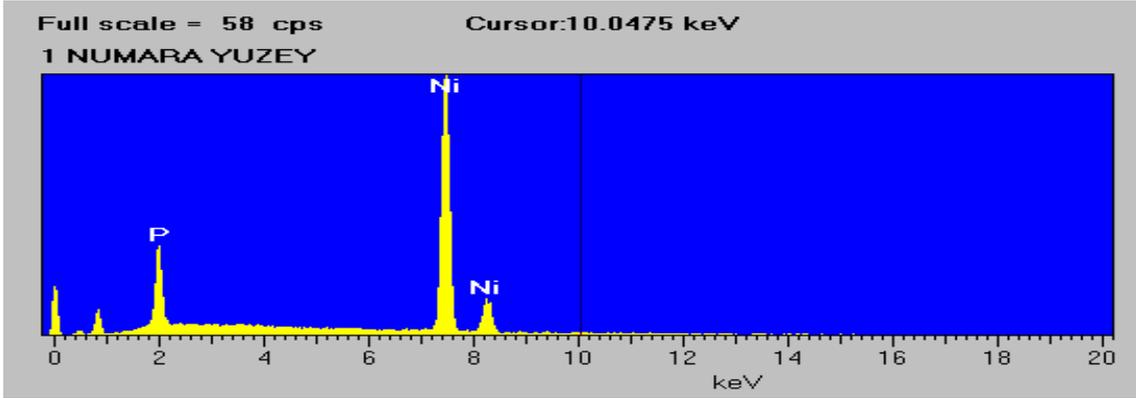
(a)



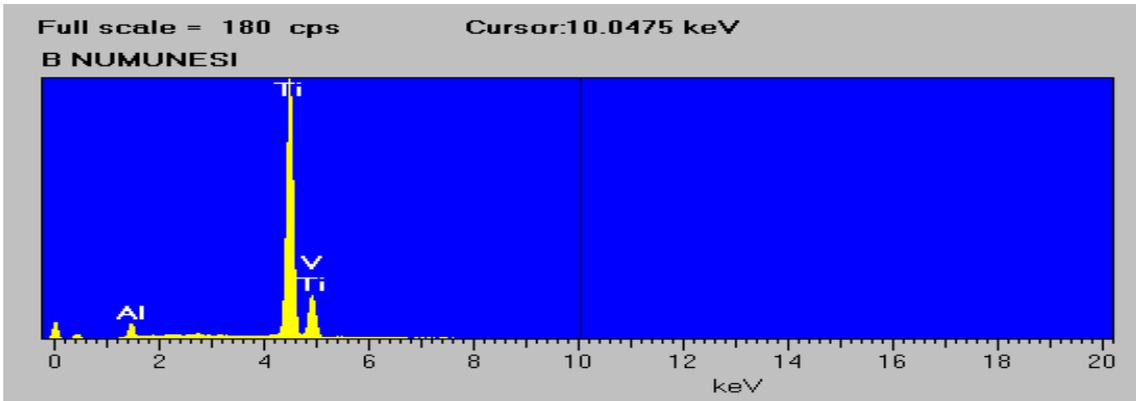
(b)

Şekil 6.4. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü
a) Ti64-1 numunesi b) Ti64-B numunesi.

Ti64-1 ve Ti64-B numunesinin aşınma yüzeyi EDS analizi Şekil 6.5.' te verilmiştir.



(a)



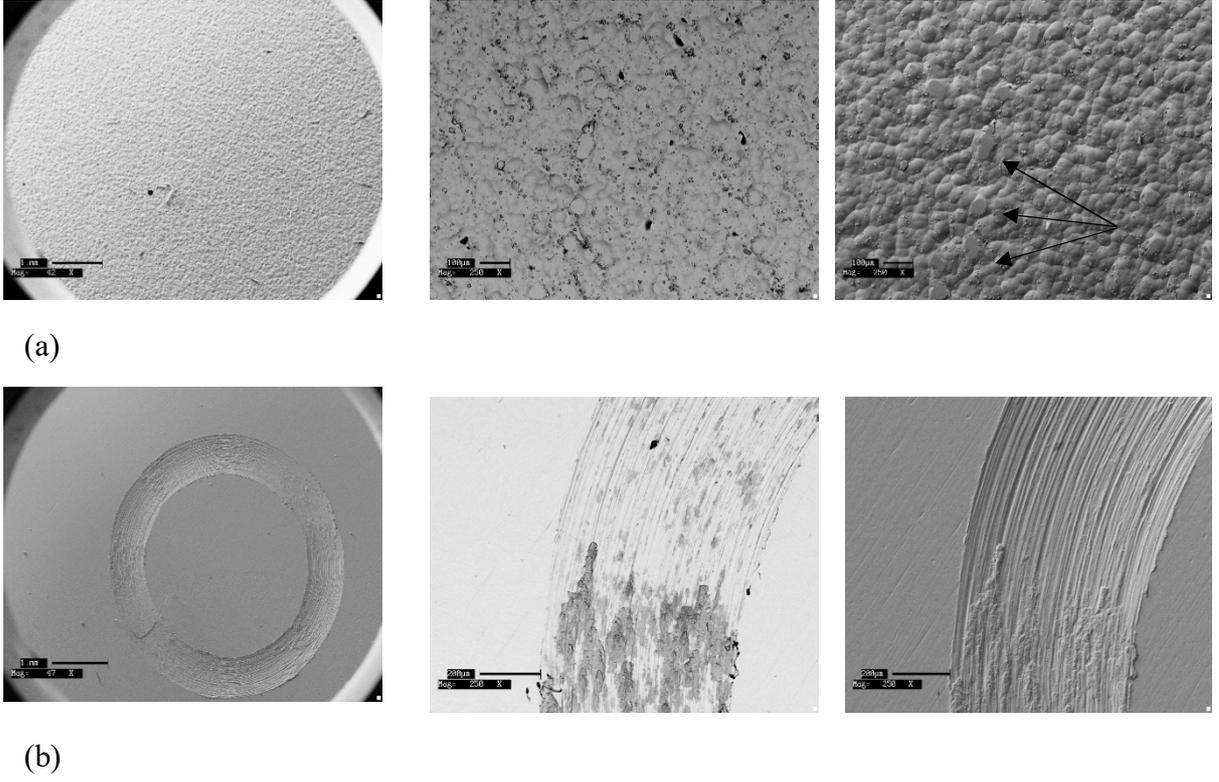
(b)

Şekil 6.5. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi
a) Tİ64-1 numunesi b) Tİ64-B numunesi.

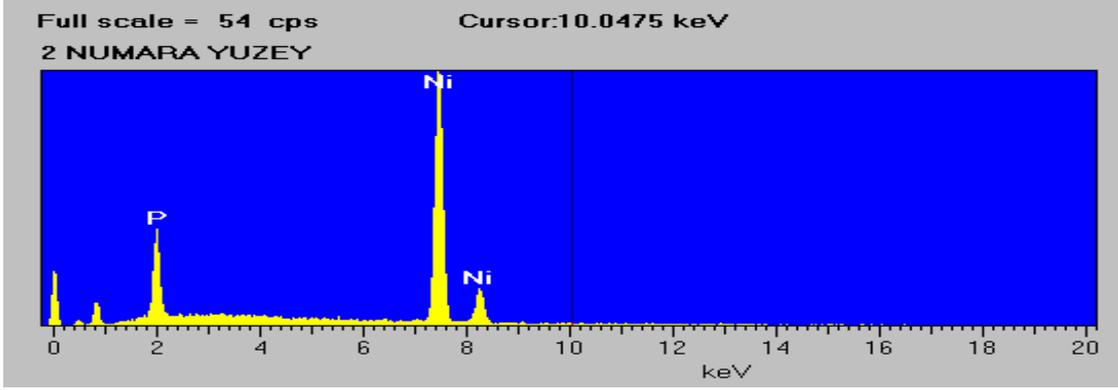
Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.' te verilenler incelendiğinde; Ni-P kaplamanın aşınma direncinin yüksek olduğu ve aşınmanın yüzeysel kaldığı görülmektedir. SEM görüntülerinde aşınma izi kaplanmamış numunede açıkça belli olmakta iken kaplanmış numunede aşınma izi tespit edilememiştir.

Aşınma, aşındırıcı bilye ile malzeme yüzeyinin ilk temas noktasında gerçekleşmiştir. Aynı zamanda kaplanmamış numunede aşınma ile birlikte oksit tabakasından kırıldığı söylenebilir. EDS analizi değerlendirildiğinde aşındırıcı bilye olarak kullanılan WC'den kaplama veya malzeme yüzeyine herhangi bir geçiş olmamıştır.

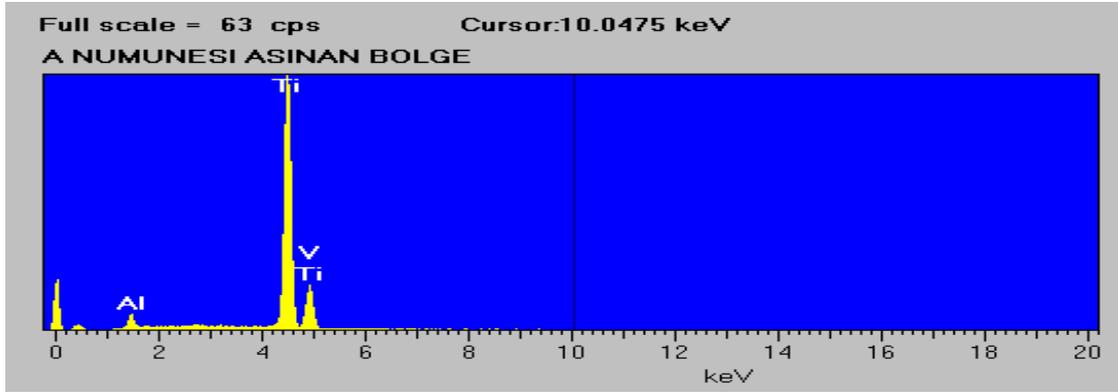
2N yük ve 80 m mesafede aşınma deneyi gerçekleştirilen Ti64-2 ve Ti64-A numunelerine ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 6.6.' da, aşınma yüzeyi EDS analizi Şekil 6.7.' de verilmiştir.



Şekil 6.6. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü
a) Ti64-2 numunesi b) Ti64-A numunesi.



(a)

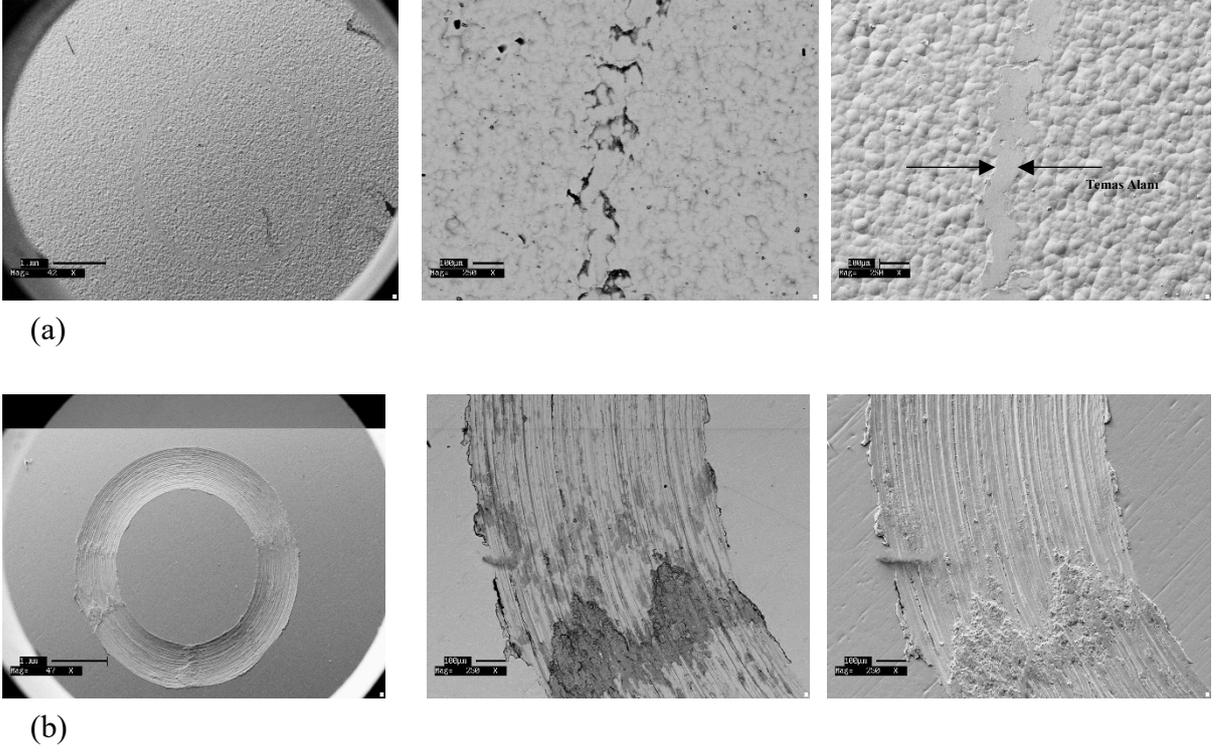


(b)

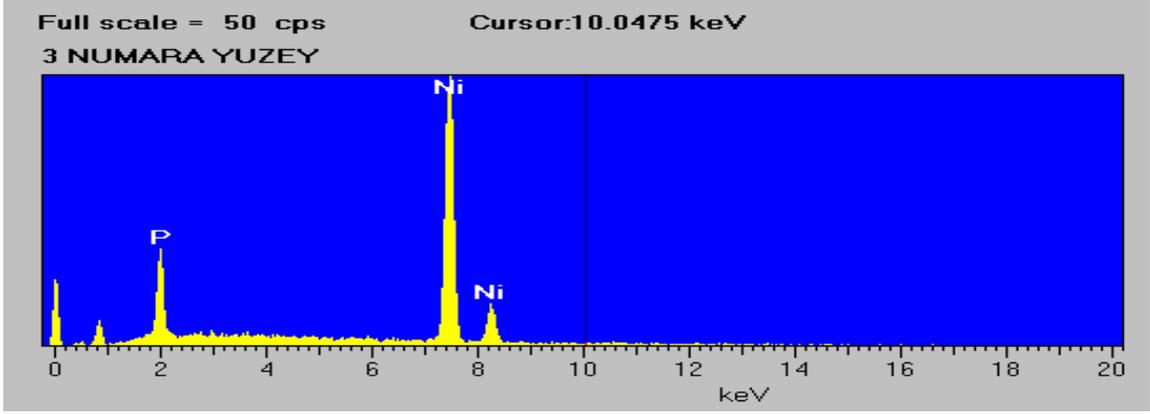
Şekil 6.7. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi
a) Tİ64-2 numunesi b) Tİ64-A numunesi.

Aynı koşullarda aşınma deneyi yapılan (2N yük ve 80 m mesafe) Ti64-2 ve Ti64-A numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde; kaplanan yüzeyin aşınma direncinin yüksek olduğu ve aşınmanın yüzeysel olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kaplanmış numunede SEM görüntüsünde aşınma izi net olarak ortaya çıkmazken kaplanmamış numunede aşınma izi net olarak görünmektedir. Aşınan bölgenin EDS analizi incelendiğinde kaplamaya veya ana malzemeye aşındırıcı bilyeden malzemeye herhangi bir geçiş olmamıştır.

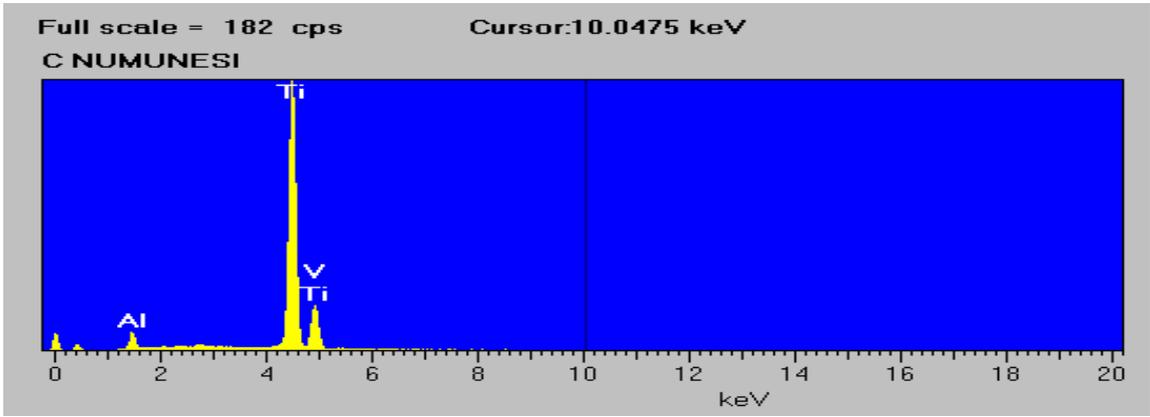
5N ve 80 m mesafede gerçekleştirilen aşınma deneyi gerçekleştirilen Ti64-3 ve Ti64-C numunelerine ait aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.8.'de, EDS analizi Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.8. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler ait aşınma yüzeyi SEM görüntüsü
a) Ti64-3 numunesi b) Ti64-C numunesi.



(a)



(b)

Şekil 6.9. Ni-P Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait aşınma yüzeyi EDS analizi
a) Tİ64-3 numunesi b) Tİ64-C numunesi.

Ti64-3 ve Ti64-C numunelerine ait SEM görüntülerinde; yükün artmasına bağlı olarak kaplamadaki aşınma izi görünmektedir. 2N yük altında kaplamada temas noktasal alanlarda kalmış, yükün artmasıyla birlikte kaplamada hasar oluşmuştur. Kaplanmamış numune ile karşılaştırıldığında kaplamanın daha az hasar aldığı görülmektedir.

Sonuç olarak; orta düzeyde akımsız nikel kaplama düşük aşınma direnci ve yüksek sürtünme katsayısı gösteren Ti-6Al-4V alaşımının sürtünme katsayısı ve aşınma oranında düşüş sağlamıştır. Sürtünme katsayısının çok düşük değerlerden yükselerek artması aşınmada adhezif tavra işaret etmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tez çalışmasında Ti-6Al-4V alaşımı üzerine uygulanan orta düzeyde Nikel-Fosfor kaplamanın malzemenin aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1) Ti-6Al-4V üzerinde orta düzeyde akımsız nikel kaplamanın uygulanabilirliği görülmüştür. Ortalama 20 µm kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Uygulanan kaplama ile birlikte görünüm olarak düzgün bir yüzey ve parlaklık sağlanmıştır.

2) Ti-6Al-4V kaplanan malzemelerin sürtünme ve aşınma direncinde iyileşme söz konusudur. Anılan iki parametrenin aynı anda iyileşme göstermesi olumlu bir sonuçtur. Akımsız nikel kaplama ile sürtünme katsayısı % 45-%50 oranında azalmıştır. Sürtünme oranındaki düşüş temas yüzeyindeki gerçek temas alanını azaltmaktadır. Aşınma yüzeyi SEM görüntüleri bu durumu desteklemektedir. Kaplanmış numunede 5N yük altında ortalama sürtünme katsayısı değerinin 2N yük altındaki kaplanmamış numunelere yakın değerde olması yükün ve mesafenin etkisiyle kaplamanın hasar almasından kaynaklanmaktadır. Aşınma oranlarında %20 - %50 oranında düşüş gerçekleşmiştir.

3) En yüksek aşınma oranı 2N yük ve 40 m mesafede kaplanmamış numunede, en düşük aşınma oranı ise 5N yük ve 80 m mesafede Ni-P kaplanmış numunede gerçekleşmiştir. Kaplanmamış numunedeki daha kısa mesafede gerçekleşen daha yüksek aşınma miktarı yüzeyin derecesi ve yüzeyde oluşan oksit filminin kararlılığına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Yük oranının artmasıyla kaplamanın oluşan basınç gerilmesine daha fazla direnç gösterdiğini söyleyebiliriz. Aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma izlerinden aşınmada kaplamanın etkisi açıkça görülmektedir. Orta düzey Ni-P kaplamanın aşınma direncine olan pozitif katkısı bu sonuçları destekler niteliktedir.

4) Aşınma bölgelerinin EDS analizi ile incelenmesi sonucunda kaplamalı ve kaplamasız numunelerde aşınma yüzeyine aşındırıcı bilye WC den herhangi bir malzeme geçişi olmamıştır. Abrasif etkiye dayalı mikro çatlaklar, kırıklar ve laminasyona rastlanılmamıştır.

5) Sürtünme katsayısının çok düşük değerlerden başlayarak yükselmesi aşınmada adhezif tavra işaret etmektedir. Aşındırıcı yüzey olarak kullanılan WC bilye ile akımsız olarak kaplanan Ni-P arasında gerçekleşmektedir. Aşınma yüzeyi SEM görüntüleri bu sonucu destekler niteliktedir.

Sonuç olarak; Ti-6Al-4V alaşımının düşük aşınma direncini arttırmak amacıyla orta düzeyde uygulanacak Ni-P kaplamaların malzemenin aşınma direncine olumlu yönde etki ettiği ve diğer önemli özellikleriyle birlikte birçok alanda kullanılan alaşımın mühendislik sistemlerinin verimliliğine pozitif katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Ti-6Al-4V alaşımının akımsız nikel-fosfor (Yüksek fosforlu) veya nikel-bor kaplanarak farklı yük ve mesafelerde gerçekleştirilecek aşınma deneyi ile aşınma davranışlarının incelenmesi farklı bir çalışma olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agarwala, R.C., Ray S., (1988). Z. Method. 79, p. 472.
- Agarwala, R. and Agarwala, V., 2003, Electroless alloy/ composite coatings: A review. Sadhana, p. 475-493
- Akagündüz, E., 2008, Isıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin mikroyapı ve yüzey çizilme dayanımları açısından incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Amiri, M. and Khonsari, M., 2010, On the thermodynamics of friction and wear. Entropy, 12(5), p. 1021-1049.
- Ashassi-Sorkhabi, H. and Rafizadeh, S.H., 2003, Effect of coating time and heat treatment on structures and corrosion characteristics of electroless Ni-P alloy deposits, Surface and Coatings Technology.
- Asm, Asm Metals Handbook Vol. 5, Surface Engineering, 1994, Ohio, ASM Materials Park.
- Axén, N. H. S. and Jacobson, S., 2001, Modern tribology handbook, friction and wear measurement techniques, p. 248.
- Bayes M., Sinitskaya I., Schell K., House R., 1991, Trans. inst. metal finish, p.140.
- Bhushan, B., 2013, Principles and applications of tribology, A John Wiley & Sons Ltd. Publication.
- Boyer, R., Welsch G., Collings E.W., 1994, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM International, p. 352
- Boyer, R. G., 2002, Tribology consultant, fundamentals of wear failure, ASM handbook volume 11. ASM International. p. 901-905.
- Chen , B.H., Hong, L., Ma ,Y. ve Ko ,T.M., 2002, “Effects of Surfactants in an Electroless Nickel-Plating Bath on the Properties of Ni-P Alloy Deposits”, Ind. Eng. Chem. Res., p. 2668-2678.
- Cheong, W.J., Luan, B. L., Shoesmith, D. W., 2004, “The Effects of Stabilizers on the Bath Stability of Electroless Ni Deposition and the Deposit”, Applied Surface Science, p. 229:282–300.
- Çelikyürek, İ., 2006, Demir alüminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dadvand, N., 2002, Investigation of the corrosion behaviour of electroless nickel-boron and nickel-phosphorous coatings in basic solutions, PhD Thesis, Metallurgical Engineering at Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
- Davis, J. R., ASM International, Introduction to Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance.
- Dearnley, P.A., 1999, A Review of metallic, ceramic, and surface-treated metals used for bearing surfaces in human joint replacement, institution of mechanical engineers proceeding, part h, journal of engineering in medicine, p. 107-135.
- Demiral, M., 2005, C95200 ve C95300 Alüminyum bronzların aşınma özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Duncan, R. N., 1981, Properties and applications of electroless nickel deposits, Finisher's management, A 26 (No.3), p. 5.
- Gawrilov, G. G., 1979, Chemical (Electroless) nikel plating, Redhill, Portcullis Pres, England.
- Graham, A.H, Lindsay, R.W., Read H.J., 1965, Electrochemical, Soc. 112, p. 401.
- Grujicic, M., Narayan, C.P., 1992 , A Study of $\beta \rightarrow \alpha$ martensitic transformation volume change in ti-al-v alloys , materials science and engineering: A, 151: p.217-226
- Henry, J.R., 1997, Electroless (Autocatalytic) plating, Metal Finishing Guidebook and Directory Issue, p. 95.
- Henschel, T., Isheim, D., Kirchheim, R., Muller, F., Kreye, H., 2000, Acta Mater., p. 48/933.
- Imam, M.A., and Fraker, A.C., 1996, Titanium alloys as implant materials, in medical applications of titanium and its alloys , Philadelphia.
- İçdem, C., 2007, Saf titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü.
- Jiaqiang, T. G., Yating, W., Lei, L., Bin, S., Wenbin, H., 2005, Crystallization temperature of amorphous electroless nickel-phosphorus alloys, Shanghai Jiao Tong University, China.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Joshi, V.A., 2006, Titanium Alloys , Taylor & Francis, London, p. 5-20.
- Kahriman, A. ve Avcı, E., (2005), Akımsız nikel kaplamaların tarihçesi, gelişimi ve banyo bileşenleri, *Yüzey İşlemler Dergisi*, s. 42:50-54.
- Kaya, B., 2007, Nano kompozit kaplama, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kato, K. and Adachi, K., 2001, Wear mechanisms. Tohoku University, CRC Press, London.
- Kenan, H., 2015, MoS₂ Katkılı PA 66 rulmanlı makaranın kaplama yapılmış aısı 1050 imalat çeliği karşısında aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keong, K.G., Sha, W., Malinov, S., 2003, Hardness evolution of electroless nickel–phosphorus deposits with thermal processing, The Queen’s University of Belfast, Ireland, UK.
- Kumar, P.S., Nair, P.K., Mater, J., 1996, *Process. Technol.* 56, p. 511.
- Leyens, C., Peters, M., 2003, Titanium and titanium alloys-fundamentals and applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 5-20.
- Long, M. and Rack, H.J., 2001, Friction and surface behaviour of selected titanium alloys during reciprocating-sliding motion, *Wear*, p. 158- 168.
- Luborsky, F.E., 1983, Amorphous metallic alloys, Butterworths, London.
- Lütjering, G. and Williams, J.C., 2007, Titanium, Springer, Berlin Heidelberg, second ed., p. 1-14.
- Mallory, G. O. and Hadju, J. B., 1990, Electroless plating, American Electroplaters and Surface Finishers Society, p. 111-195.
- Özden, R.C., 2015, Sıcak haddelenmiş AZ91 magnezyum alaşımı üzerine uygulanan akımsız Ni-P-W kaplamanın korozyon ve aşınma özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Parker, K., Effects Of Heat Treatment On The Properties Of Electrless Nickel Deposits, Plating And Surface Finishing, A 68 (No.12), p.71.
- P. Figiel, S., Zimowski, P., Klimczyk, T., Dziwisz, L., Jaworska, 2008, *Arch. Mater. Sci. Eng.* p.83.
- Rhodes, C.G. and Paton, N.E., 1979, Formation characteristics of the α/β interface phase in Ti-6Al-4V, *Metallurgical Transactions A*, 10: p.209-216 .

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Riedel, W., 1991, Electroless nickel plating, ASM International.
- Stallman, K. and Specthardt, H., 1981, Deposition and properties of nickel-boron coatings, *Metalloberflaenhe Angewandte Electrochemie*, A 35 (No.10), p. 979.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., 2013, Friction-Induced vibrations and self-organization: mechanics and non equilibrium thermodynamics of sliding. *engineering tribology*, Butterworth Heinman, UK, p.1-73.
- Şafak, H.E., 2008, Yüzeyi PVD yöntemi ile kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Taktak, Ş., 2002, Plazmada nitrülenmiş Ti6Al4V alaşımının difüzyon kinetiği ve aşınma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tylczak, J.H. and Oregon, A., 1992, Friction, lubrication and wear technology, ASM Metal Handbook Volume 18, ASM International, USA, p. 640-655.
- Yemenci, S., 2015, Azot difüzyonunu önlemeye yönelik 50CrMo4 çeliğinin akımsız nikel fosfor (Ni-P) kaplanması, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, Q., Wu, M. and Zhao, W., 2005, Electroless nickel plating on hollow glass microspheres, *surface & coatings technology*.
- Zeng, L. and Bieler, T.R., 2005, Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α and Q phases in Ti-6Al-4V wire, *Materials Science and Engineering*, p. 403-414.