

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ
Ti6AL4V ALAŞIMININ YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN VE AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatay DEMİRBAŞ

Enstitü Anabilim Dalı

**: METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı

: Dr. Öğr. Üyesi Aysun AYDAY

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE
KAPLANMIŞ Ti6Al4V ALAŞIMININ YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN VE AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

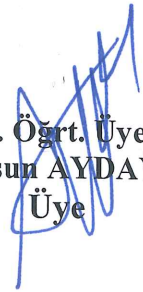
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatay DEMİRBAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr.
Ahmet ÖZEL
Jüri Başkanı


Dr. Öğrt. Üye.
Aysun AYDAY
Üye


Dr. Öğrt. Üye.
Ekrem ALTUNCU
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Çağatay DEMİRBAŞ

14.06.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aysun AYDAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü yönetimi ve akademik kadrosuna teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimime başladığım ilk günden bugüne kadar her daim yanımda olan ve destekleriyle beni sürekli motive eden değerli eşim İrem DEMİRBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aile büyüklerim annem ve babam Nevin & Sabahi DEMİRBAŞ'a, çalışmalarım sırasında her daim yanımda bulunan değerli meslektaşım Erdi DEMİRKAYA'ya ve son olarak kıymetli arkadaşım Gizem DEMİRBAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-049) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI	3
2.1. Titanyum Alaşımları	3
2.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	4
2.2.1. α alaşımları	5
2.2.2. β alaşımları	5
2.2.3. $\alpha + \beta$ alaşımları.....	6
2.3. Ticari Saflıktaki Titanyum	7
2.4. Yaygın Kullanılan Titanyum Esaslı Metal Alaşımlar	8
BÖLÜM 3.	
MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ.....	10
3.1. Mikro Ark Oksidasyon.....	10
3.2. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulama Alanları	10
3.3. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Avantajları	11

3.4. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi	12
BÖLÜM 4.	
HAFİF ALAŞIMLAR.....	14
BÖLÜM 5.	
AŞINMA.....	16
5.1. Adhesiv Aşınma	18
5.1.1. Sünek malzemelerde adhesiv aşınma	18
5.1.2. Gevrek malzemelerde adhesiv aşınma	19
5.2. Tribo-Oksidatif Wear	19
5.3. Abrasif Aşınma	19
5.3.1. Sünek malzemelerde abrasif aşınma	20
5.3.2. Gevrek malzemelerde abrasif aşınma	21
5.4. Yorulma Aşınması.....	21
5.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	22
5.5.1. Esas sürtünme elemanına bağlı olanlar	22
5.5.2. Karşı elemana bağlı olanlar	22
5.5.3. Ortama bağlı olanlar.....	22
5.6. Aşınma Testleri ve Yöntemleri	23
5.6.1. Ağırlık farkı yöntemi.....	24
5.6.2. Kalınlık ölçme yöntemi	24
5.6.3. İz değişiminin izlenmesi yöntemi	24
5.6.4. Radyo izotoplar ile ölçme yöntemi	25
5.6.5. Aşınma testleri.....	25
5.6.5.1. Pin-on-disk testi	25
5.6.5.2. Blok-on-ring	26
5.6.5.3. Disk-on-disk	27
5.6.5.4. Pin abrazyon aşınma testi (PAT)	28
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29

6.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması İşlemi	29
6.2. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi	30
6.3. Yüzey Karakterizasyonu İçin Yapılan Analizler.....	30
6.4. Aşınma Deneyleri.....	31
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	33
7.1. SEM Görüntüleri	33
7.2. EDS Analizleri	36
7.3. XRD Analizleri	39
7.4. Aşınma Deneyleri Sonuçları	41
7.4.1. Aşınma hacmi değerleri	41
7.4.2. Aşınma hızı	46
7.4.3. Aşınma izi SEM görüntüleri	49
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
8.1. Sonuçlar.....	62
8.2. Öneriler.....	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
EDS	: Enerji Difraksiyon Spektrometresi
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
PAT	: Pin Abrasyon Aşınma Testi
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X Işını Difraktometresi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. HSP ve HMK yapıları a) Alfa- Titanyum b) Beta-Titanyumun [1].....	3
Şekil 2.2. Alaşım elementlerinin titanyumun faz diyagramına olan etkisi [2].....	4
Şekil 2.3. Titanyum ve beta dengeleyicinin basitleştirilmiş faz diyagramı [4].....	6
Şekil 3.1. MAO işlemi düzeneği ve kullanılan donanım [21].....	12
Şekil 3.2. MAO işleminin basamakları [14].	13
Şekil 5.1. Aşınma mekanizmaları [22].....	17
Şekil 5.2. Parçalar arasındaki bağıl hareket örnekleri.	17
Şekil 5.3. İlerleme mesafesi ve aşınmanın hacmi.	19
Şekil 5.4. İki parçalı abrasif aşınma [22].	20
Şekil 5.5. Abrasif aşınma [22].	21
Şekil 5.6. Pin-on disk testinin şematik gösterimi.	26
Şekil 5.7. Blok-on-ring testinin şematik gösterimi.	27
Şekil 5.8. Disk-on-diski testinin şematik gösterimi.	28
Şekil 6.1. Aşınma izi şematik görünüşü.....	31
Şekil 7.1. MAO kaplama sonrası düşük büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P -.....	34
Şekil 7.2. MAO kaplama sonrası yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P b) Ti-6Ca-4P (c) Ti- 8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P.....	35
Şekil 7.3. MAO kaplama sonrası düşük büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P-1Ag b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag.....	36
Şekil 7.4. MAO kaplama sonrası yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P-1Ag b) Ti-4Ca-4P- 3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag.....	36
Şekil 7.5. Ti-4Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi	37
Şekil 7.6. Ti-6Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi	37

Şekil 7.7. Ti-8Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi	37
Şekil 7.8. Ti-10Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi	38
Şekil 7.9. Gümüş nitrat ilave edilen Ti-4Ca-4P-3Ag kodlu numunenin SEM görüntüleri ile EDS-MAP analizleri verilmiştir.....	38
Şekil 7.10. Ti-4Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.	39
Şekil 7.11. Ti-6Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.	40
Şekil 7.12. Ti-8Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.	40
Şekil 7.13. Ti-10Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.	41
Şekil 7.14. Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri	43
Şekil 7.15. Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag, Ti-4Ca-4P-5Ag numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri.	44
Şekil 7.16. Gümüş ilavesiz ve gümüş ilaveli tüm numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri.....	45
Şekil 7.17. Gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P ve gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numunelerinin parlatma öncesi ve parlatma sonrası 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri.....	46
Şekil 7.18. Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri.....	47
Şekil 7.19. Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag, Ti-4Ca-4P-5Ag numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri.....	47
Şekil 7.20. Gümüş ilavesiz ve gümüş ilaveli tüm numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızları değişimleri.	48
Şekil 7.21. Gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P ve gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numunelerinin parlatma öncesi ve parlatma sonrası 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri	48
Şekil 7.22. Gümüş ilavesiz numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6 Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P)	50

Şekil 7.23. Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P).....	50
Şekil 7.24. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P).....	51
Şekil 7.25. Gümüş ilaveli numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag).....	52
Şekil 7.26. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag).....	52
Şekil 7.27. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag).....	53
Şekil 7.28. Gümüş ilavesiz numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P).....	54
Şekil 7.29 Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P).....	55
Şekil 7.30. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P).....	55
Şekil 7.31. Gümüş ilaveli numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag).....	56
Şekil 7.32. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag;).....	57

Şekil 7.33. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)	57
Şekil 7.34. Gümüş ilavesiz numunelerinin (0.5 N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P).....	58
Şekil 7.35. Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P	59
Şekil 7.36. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P	59
Şekil 7.37. Gümüş ilaveli numunelerinin (0,5N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag)	60
Şekil 7.38. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag	61
Şekil 7.39. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelede yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag	61

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Ticari saflıkta bulunan titanyum sınıflarının özellikleri [2].....	7
Tablo 4.1. Hafif metallere ait uygulama örnekleri [20].	15
Tablo 5.1. Basite indirgenmiş tribolojik testler, ilgili aşınma işlemleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları [21, 25, 26]	24
Tablo 6.1. Ti6Al4V kalite titanyum alaşımının kimyasal bileşim aralığı.....	29
Tablo 6.2. Ti6Al4V kalite titanyum alaşımının mekanik özellikleri.	29
Tablo 6.3. Kullanılan çözelti miktarları, voltaj ölçümleri, pH değerleri ve işlem süresi.....	30
Tablo 7.1. Aşınma testi sonrası numunelerin aşınma alanı ve hacmi değerleri	42

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikro Ark Oksidasyon, SEM, EDS, XRD, Aşınma testi, Elektrolit çözelti

Bu çalışmada, sabit sürede farklı çözeltiler kullanılarak Mikro Ark Oksidasyon (MAO) ile kaplanan Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Yapılan kaplama işleminden sonra numunelerin yapısal karakterizasyon ve morfolojik yapıları Enerji Difraksiyon Spektrometresi (EDS) destekli Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Difraktometresi (XRD) yardımıyla analizleri yapılmıştır. Kaplama sonrası aşınma dayanımları incelenmesi amaçlanmıştır.

Farklı oranlarda $C_4H_8CaO_5$, Na_3PO_4 çözeltisine $AgNO_3$ ilave edilmeden ve ilave edilerek MAO işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözeltilerin pH değerleri MAO işleminden önce incelenmiştir. Kaplama işleminden sonra numunelerin SEM ve EDS yardımıyla mikro yapısal incelemeleri ve XRD ile kimyasal analizleri yapılmıştır. Daha sonra lineer aşınma çalışma prensibine sahip Ball on Disk yöntemiyle aşınma 6mm çapında Al_2O_3 bilya yardımıyla 50 m mesafe boyunca aşınma testine tabi tutulmuştur.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre, sabit süre ve voltajda tutulmak şartıyla $C_4H_8CaO_4.H_2O$ çözeltisinin ölçüsü artırılarak akım kontrollü deneyler yapılmış, artan çözelti yüzdesi ile yüzey pürüzlülüğü azalmış, mikropor çapları küçülmüştür. Gümüş nitrat ilave edilen kaplamaların aşınma dayanımlarının daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF SURFACE PROPERTIES AND WEAR BEHAVIOR OF Ti6Al4V ALLOY COATED WITH MICRO ARC OXIDATION METHOD

SUMMARY

Keywords: Micro Arc Oxidation, Sem, EDS, XRD, Abrasion test, Electrolyte solution

In this study, the development of surface properties of Ti6Al4V alloy coated with Micro Arc Oxidation (MAO) using different solutions in a fixed time was investigated. After the coating process, structural characterization and morphological structure of the samples were analyzed by Energy Dispersive Spectrometer (EDS) supported Scanning Electron Microscope (SEM) and X Ray Diffractometer (XRD). It is aimed to investigate the abrasion resistance after coating.

MAO process was carried out using different amounts of CaH_2CaO_5 , Na_3PO_4 solution without AgNO_3 addition and addition. The pH values of the solutions were examined before MAO treatment. After the coating process, microstructural examination of the samples with the help of SEM and EDS and chemical analysis with XRD were performed. Then, with the Ball on Disk method with linear wear working principle, wear was subjected to abrasion test with the help of Al_2O_3 balls with a diameter of 6mm for a distance of 50 m.

According to the findings obtained in the study, the flow rate controlled experiments were carried out by increasing the size of $\text{CaH}_2\text{CaO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution, provided that it was kept at constant time and voltage, surface roughness decreased and micropore diameters decreased with increasing solution percentage. It has been found that the wear resistance of the coatings added with silver nitrate is higher.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları, mükemmel birçok özelliğinden dolayı cazip bir malzeme olarak birçok alanda tercih edilmektedir. Titanyum ve alaşımlarının tercih edilen bir malzeme olmasının başlıca özellikleri yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunlukları, biyo uyumluluk, yüksek mekanik özellikleri ve mükemmel korozyon dirençleri olarak sıralanabilir. Bu özelliklerinden ötürü özellikle medikal uygulamalar (iç protezler, vidalar vb.) ve dental alanlar başta olmak üzere askeri alanlarda, denizcilik, uçak ve uzay sanayinde geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Mikro ark oksidasyon yaklaşık 45 sene önce Sovyetler Birliği'nde ki çalışmalarla ortaya çıkmaya başlamış, 1970'lerde Amerika Birleşik Devletleri yaptığı çalışmalarla geliştirilerek 1980'li yılların başlarından tüm dünya bilim dünyasına katılmıştır. Geleneksel oksidasyon işlemine göre daha çevreci bir yöntem olan Mikro ark oksidasyon işlemi ayrıca daha seri, daha sağlam ve poroz bir oksit tabakasına sahip bir işlemdir. Mikro ark oksidasyon işlemi çözünmüş tuzlar içeren elektrolitik bir banyo içerisinde elektrokimyasal oksidasyon ile yüksek voltaj akım davranışını birleştirir.

Titanyum ve alaşımlarının yüzeylerinin biyo-uyumlu ve istenen özelliklerde titanyum oksit ile kaplanması için günümüzde pek çok uygulama yapılmaktadır. Fakat bu yöntemler arasında mikro ark oksidasyonun gösterdiği avantajlar son yıllarda daha çok kullanılmasına neden olmaktadır. Biyo uyumlulukta en önemli özelliklerden birisi olan yapılabilecek gümüş ilaveleriyle mükemmel antibakteriyel özellik göstermesi olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada mikro ark oksidasyon işlemi ile yüzeylerinde oksit tabakası oluşturulmuş Ti6Al4V numunelerin yüzey özelliklerine değişen parametrelerin etkisi ve aşınma dayanımları incelenmiştir. Mikro ark oksidasyon işlemi sabit volt

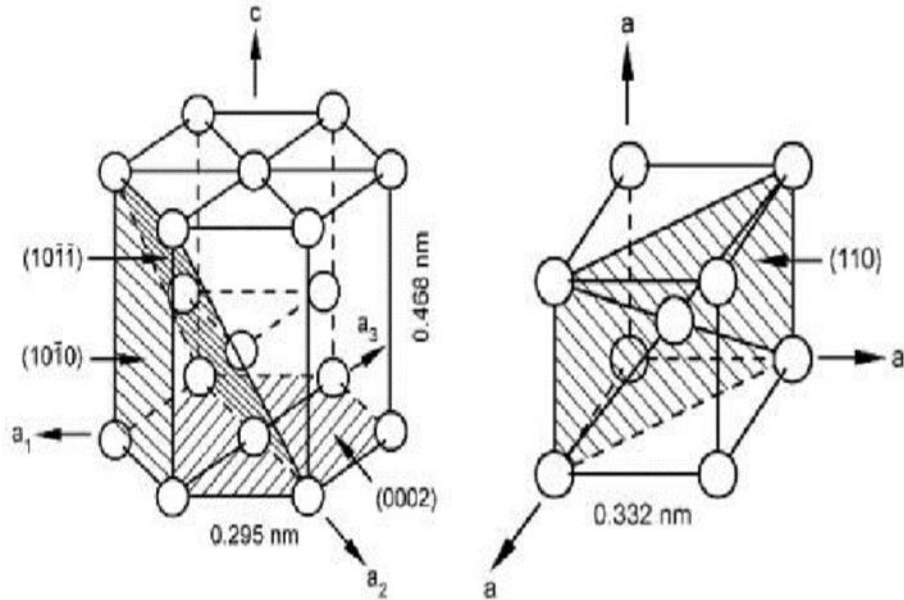
değerlerinde, farklı oranlarda $C_4H_8CaO_5$, Na_3PO_4 ve $AgNO_3$ oluşan çözeltileri içerisinde 5 dakika süre ile yapılmıştır. Daha sonra aşınma testi ve değişen çözelti parametreleri ile işlem koşullarının oluşan oksit tabakasına etkisi hakkında bilgi edinilmiştir.



BÖLÜM 2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

2.1. Titanyum Alaşımları

Titanyum, farklı sıcaklıklarda gösterdiği farklı kristal yapıları gösterene metaldir. Sıcaklığa bağlı kristal yapının farklılığı allotropi olarak adlandırılmaktadır. Saf titanyum ve alaşımlarının pek çoğu düşük sıcaklıklarda kristalize olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda Hekzagonal sıkı paket (HSP) yapısına, yani alfa (α)-titanyuma dönüşmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise hacim merkezli kübik (HMK) yapıdadır. HMK yapısında ise beta (β)-titanyum olarak adlandırılmaktadır. Saf titanyumun beta geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 882°C 'dir [1]. HSP ve HMK yapıları Şekil 2.1.'de verilmiştir.



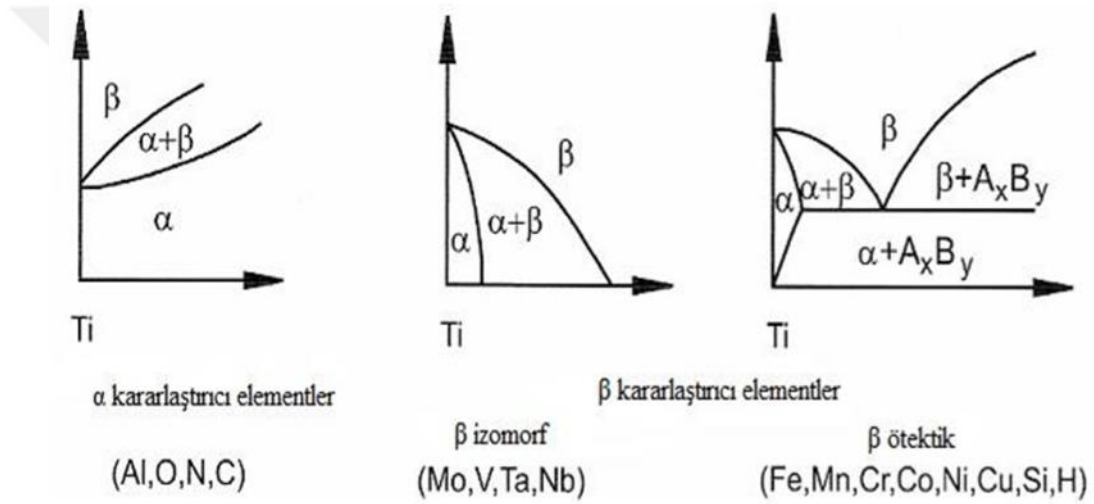
Şekil 2.1. HSP ve HMK yapıları a) Alfa- Titanyum b) Beta-Titanyumun [1].

2.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum yapısında bulundurduğu fazlara göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- a) Alfa alaşımları
- b) Alfa-Beta alaşımları
- c) Beta alaşımlarıdır.

Şekil 2.2.'de alaşım elementlerinin titanyumun faz diyagramına olan etkisi görülmektedir [2].



Şekil 2.2. Alaşım elementlerinin titanyumun faz diyagramına olan etkisi [2].

α -fazının dönüşüm sıcaklığını yükselterek kararlı faz haline getiren alüminyum (Al) elementidir. Alüminyumun dışında oksijen (O), azot (N) ve karbon (C) da kararlı faz haline getirmektedir [2]. β -fazının kararlı hale getirilmesi için dönüşüm sıcaklığını düşüren iki tip element grubu bulunmaktadır. Bunlar beta izomorf ve beta ötektiktir. Molibden (Mo), vanadyum (V), tantal (Ta) ve niyobyum (Nb) elementleri beta fazının içinde tamamen çözünmektedir [3].

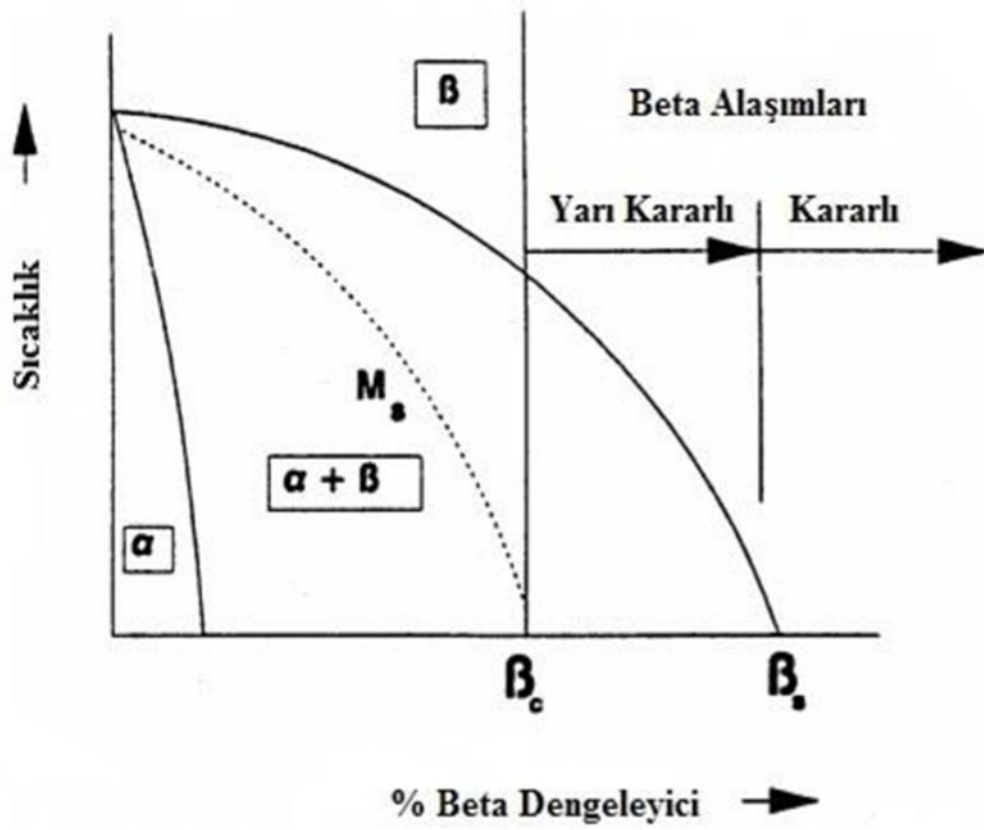
2.2.1. α alaşımları

Yapısında yalnızca alfa fazını bulundurlar. Alfa fazını başta Al ve O olmak üzere, N ve C alaşım elementleri de kararlı halde tutarlar [2]. Alfa fazına sahip titanyum alaşımları yüksek dayanımın yanı sıra yüksek korozyon direncine ve şekil değiştirilebilirlik özellikleri ile de öne çıkmaktadır. Çok düşük ya da yüksek sıcaklıklarda süneklik özelliklerini koruyabilmektedirler. α alaşımları öncelikle kimya sanayisinde ve proses mühendisliğinde kullanılmaktadır [2].

2.2.2. β alaşımları

Beta titanyum alaşımları, işlenebilirlik, mikro yapı, mekanik özellikleri ile çok yönlü malzemeler sınıfındadır. Bu alaşımlar içinde kararlı, yarı kararlı ve beta fazı zengin alfa-beta alaşımı ihtiva ederler. HMK yapının sonuçları olarak ısıtılabilirliği artırılmış, derin çekme ve süneklik özellikleri ile alfa-beta alaşımlarına göre daha iyi bir alternatiftir. Bunlara ilave olarak üstün yorulma direncine sahiptir.

β -alaşımları, yapısında, beta faz alanından su vermeye göre yapısındaki tüm betayı koruyan alaşımlar olarak ifade edilir. β alaşımları, martenzit yapı oluşumunu engellemek için beta dengeleyici elementleri içerir. Kararlı β alaşımları olarak ifade edilen minimum beta dengeleyici konsantrasyonu (β_s), aynı zamanda, yarı kararlı olarak da bilinen alaşımların bileşim miktarlarını belirlemektedir. Bu yarı kararlı malzemeler, su verme işlemi sonucunda oluşan %100 beta fazı ihtiva etmesine karşın, bu beta fazı yarı kararlıdır. Ayrıca bu alaşımların yaşlandırma işlemi süresince, geçiş sıcaklığının altında alfa fazı çökmesi görülür. Kararlı beta alaşımlarına yaşlandırma işleminin uygulanması söz konusu değildir [4].



Şekil 2.3. Titanyum ve beta dengeleyicinin basitleştirilmiş faz diyagramı [4].

2.2.3. $\alpha + \beta$ alaşımları

$\alpha + \beta$ alaşımları, oda sıcaklığında içerisinde α ve β fazlarını ihtiva ederek kararlı yapıda olurlar. Termodinamik olarak dengedeki pek çok ikili β dengeleyici alaşımları iki fazda bulunurlar. Gerçekte $\alpha + \beta$ alaşımları, çoğunlukla α ve β dengeleyicilerini bünyesinde bulundurlar [3].

$\alpha + \beta$ alaşımlarının en çok kullanılanı titanyum alaşımları içinden Ti6Al4V'dir. Günümüzde kullanılan titanyum alaşımlarının %50'sinden fazlası bu fazda bulunmaktadır. Yüksek dayanımın gerektiği durumlar için üretilmiş olan Ti-6-6-2 ve IMI 550 de diğer $\alpha + \beta$ alaşımlarıdır [2].

2.3. Ticari Saflıktaki Titanyum

Ticari saflıktaki Ti, içerisindeki C, H, Fe, N ve O miktarlarına göre sınıflandırılmaktadır. Kimyasal kompozisyonda bulunan C ve Fe gibi ara yer atomlarıyla oksijenin redüksiyona girmesiyle dayanımı büyük ölçüde değiştirmektedir [2]. Tablo 2.1.'de ticari saflıkta bulunan titanyum sınıflarının özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Ticari saflıkta bulunan titanyum sınıflarının özellikleri [2].

	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Kimyasal Kompozisyon % Ağırlık					
			α	β	N	C	H	Fe	O	P
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,1	0,015	0,2	0,18	0
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,1	0,015	0,3	0,25	0
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,1	0,015	0,3	0,35	0
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,1	0,015	0,5	0,4	0
Grade 7	280	340	913	890	0,05	0,1	0,015	0,3	0,25	0,2

1000 ppm'den fazla olmak kaydıyla O, Fe, C ve Si elementleri ticari saflıktaki titanyumda safsızlığın bozulmasına neden olan en önemli maddelerdir. Çeşitli sınıflardaki alaşımsız titanyumları temel kimyasal analizlerinde ayırt edilebilmesi zordur. Ayrıca küçük miktarlardaki ara yer empürileri mekanik özelliklere büyük ölçüde etkilemektedir.

Ticari saflıktaki titanyum, 1950'li yıllardan beri mil ürünleri olarak kullanılmakta olup dayanımı dışında iyi şekil verilebilirlik ve korozyon direnci özelliklerini gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Uçak ve uzay endüstrisinde, alüminyum alaşımlarından daha yüksek ısı direncini gösterebilen ve çelikten daha hafif malzeme

ihtiyacıyla bu malzemenin üretiminde artış olmuştur. Bunun yanı sıra yüksek korozyon direnci ve iyi kaynak edilebilme özelliği ile de bu endüstride kullanılabilirliği yüksek bir malzemedir [2].

2.4. Yaygın Kullanılan Titanyum Esaslı Metal Alaşımlar

$\alpha + \beta$ titanyum alaşımlarının arasından Ti6Al4V ve Ti6Al7Nb günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti6Al4V, 1950’li yıllardan beri Amerika Illinois Teknoloji Enstitüsü’nde oluşturulmuştur [2]. Dünya genelinde bulunan Ti tonajının yarısından fazlası bu alaşım şeklinde kullanılmaktadır. Bu kullanımın yaklaşık olarak %80’i ise uçak ve uzay endüstrisindedir. Yaygın olarak kullanılan diğer bir alan ise %3’lük pay ile medikal sektördür. Bunların dışında otomotiv, deniz ve kimya endüstrilerinde de kullanılmaktadır.

Ti6Al4V alaşımı günümüzde yaygın olarak, türbin motorlarında ve uçak gövdesinin uygulamalarında kullanılmaktadır. Motor bileşenlerinin içinde bulunan pervane kanatlarında, disklerde ve hareket elemanlarında kullanılır. Uçak ve uzay endüstrisinde, süper plastik karaktere sahip ince ve eş eksen taneye sahip Ti6Al4V alaşımı kullanılmaktadır. Ayrıca süper plastik formlar ile kombinesinde karmaşık yapıların üretilmesine imkân veren, difüzyon-bağ karakteri özelliğine sahiptir. Süper plastik biçimindeki form edilmiş ve difüzyon-bağları içeren yapıların büyük bölümü askeri havacılık olmak üzere, günümüzde mevcut kullanım alanı bulunmaktadır.

Ti6Al4V alaşımı, düşük elastisite modülü, iyi çekme ve yorulma dayanımları ve biyo uyumluluğunun da olması nedeniyle cerrahi implantların üretilmesinde tercih edilen bir malzemedir. Kalça, diz, dirsek, parmak, çene implantlarında ve kemik vidalarında kullanılmaktadır.

Dövme yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı yaygın olarak askeri alanda silah sistemlerinde, denizcilik alanında özellikle deniz radarı malzemelerinde ve su altı uygulamalarında bulunmaktadır. Dökme olarak üretilen malzemeler ise su püskürtmeli

endükleyicilerde, nükleer denizaltılarında ve deniz suyu bilyeli valflerde kullanılmaktadır [3].

Niyobyum, vanadyuma göre biyo uyumluluğu daha yüksek ve çok daha ucuz olması sebebiyle 1980’li yıllar itibariyle Ti6Al4V yerine Ti6Al7Nb tıbbi ve cerrahi uygulamalarda kullanılmaya başlamasıyla birlikte Ti6Al7Nb genellikle tıbbi cihaz sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir [5].



BÖLÜM 3. MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ

3.1. Mikro Ark Oksidasyon

Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) olarak da bilinen bilinenin dışında bir yüzey modifikasyon tekniği olarak hafif metallere, Al, Ti, Mg, Nb ve alaşımlarının yüzeyinin üzerinde kalın ve sert seramik kaplamaların elde edilebilmesini sağlayan elektrokimyasal bir işlemdir Mikro ark oksidasyon yöntemi [6]. Metal ve alaşımlarının sulu elektrolit içinde işlem gördüğü anodik oksidasyon işlemine dayanan MAO; hafif metaller olan alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımlarının üzerinde oksit bir film kaplama oluşturmak için yüksek voltaj ve uygun elektrolitlerin kullanılmasıyla yapılır [7,8]. İki bölümde meydana gelen MAO işleminin ilk bölümü elektroliz işlemidir. Bu işlem kaplanacak altlık malzemesiyle karşı elektrodun arasındaki farklı potansiyellerin sıvı elektrolit içinde uygulanmasıyla oluşur. İkinci bölümde ise elektriksel deşarjlar altlık malzeme yüzeyine yakın yerlerde meydana gelir [9]. MAO işlemlerinde Doğru akım (DC), alternatif akım ve hetero polar akım güç kaynakları kullanılabilirler [10]. MAO işleminde kaplama kalınlığı, korozyon direnci, aşınma direnci ve sertlik, elektrolit sıcaklığı, elektrolit bileşimi, kaplama süresi ve elektriksel parametrelere bağlı olarak değiştirilebilmektedir [6].

3.2. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulama Alanları

MAO yüksek ısıya dayanıklı kaplamalar oluşturması ve yüksek di-elektrik özellikler göstermesi sebebiyle otomotiv, askeri, uçak ve uzay sektörlerinde birçok alanda kullanılmaktadır. Bu özelliği nedeniyle özellikle uzay sanayisinde füzelerin ve uzay mekiklerinin koruyucu kaplamaları üretiminde önemlidir. Ayrıca MAO teknolojisi sadece yüksek sıcaklıklarda değil orta derecedeki sıcaklıklara, güçlü asit ve bazlara karşı dirençli olması nedeniyle kimyasal uygulamalarda; sahip olduğu yüksek oksit

sertliği ($> 1300 \text{ kg/mm}^2$) katmanından dolayı aşınma direncini arttıran bir etken olarak mekanik uygulamalarda; termal ve elektrik-elektronik uygulamalarında kullanılabilen bir yüzey modifikasyon işlemidir.

[11,12]. Mikro ark oksidasyon teknolojisi uzay endüstrisi, otomotiv endüstrisi, tekstil endüstrisi, tıp, mutfak araç gereçleri ve denizcilik sanayisinin birçok alanında kullanılmaktadır [13].

3.3. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Avantajları

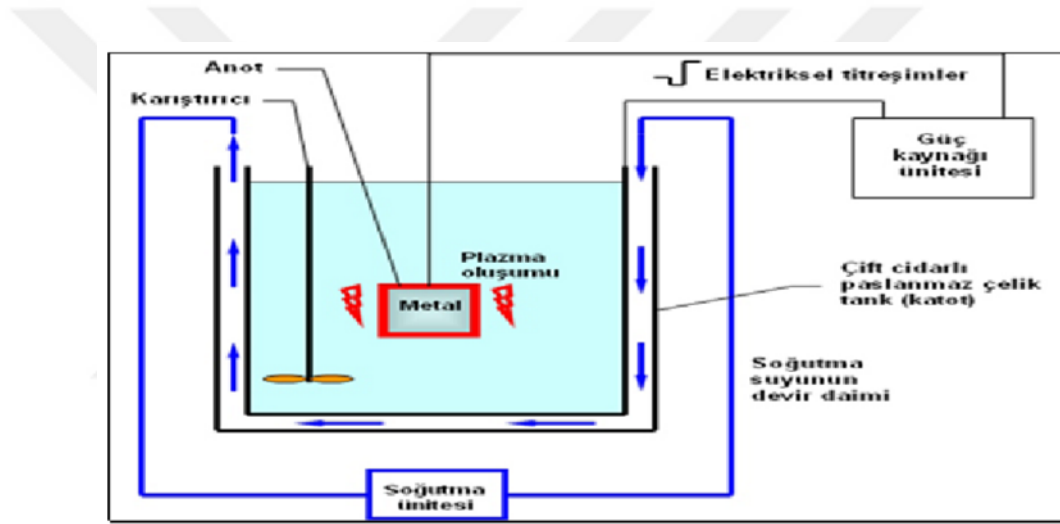
MAO teknolojisi yaklaşık olarak 60 yıldır kullanılmakta olup günümüzde pek çok alanda uygulandığından dolayı avantajlı yöntem olduğu söylenebilir. Yüzey işleme teknolojileri ile karşılaştırıldığında, MAO teknolojisinde işlem öncesinde numunenin hazırlanması işleminin daha az önemli olduğu görülebilir. Bu özelliği sayesinde seri üretimi olur. Ayrıca hafif metallerin geleneksel yöntemler ile kaplanabilmesine alternatif olan MAO işlemi, zehirli atıkları ihtiva etmemesi nedeniyle avantajlı bir yöntemdir. Aşınma ve korozyon direnci yüksek olan kaplamaların elde edilebilmesine imkân veren mikro ark oksidasyon teknolojisi, demir esaslı parçalara alternatif olarak hafif alaşımlar olan Al, Mg ve Ti otomotiv sanayisinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Hafif metallerin hepsine uygulanabilen MAO işlemi, kaplanması geleneksel anotlamayla zor olan yüksek silisyum (Si) ihtiva eden döküm malzemelerinin, yüksek bakır (Cu) ihtiva eden Al alaşımlarının $300 \mu\text{m}$ kalınlığına kadar ulaşabilmesini sağlaması oldukça önemlidir [11,14,15].

MAO teknolojisi, anodik oksidasyon ile karşılaştırıldığında, daha yüksek voltajlara çıkılabilmesi nedeniyle yüksek kaplama oluşum hızı ve kalınlığıyla daha üstündür. MAO teknolojisi altlık malzemesi ile beraber gelişen yüksek adezyon kuvveti ile plazma spreyleme yönteminden daha üstün işlemdir. Kullanılan elektrolitler yönünden sert krom kaplama yöntemiyle karşılaştırıldığında, MAO işleminde kullanılan alkali elektrolitlerin çevreye zararlı olmadığı görülür. Kısacası, MAO işlemi gelişimini sürdürmeye devam eden, yüksek tribolojik özelliklerin eldesini sağlayan, gelişmiş

yüzey işleme yöntemiyle geleneksel kaplamaların pek çoğunun yerini alacak teknolojidir [16,17,18].

3.4. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi

MAO ünitesi güç kaynağı, elektrolit havuzu, anot, katot ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. MAO işlemi elektrolit içinde bulunan anot malzemeye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj uygulanarak gerçekleştirilen ve anotta ark oluşturularak, anot yüzeyinde oksit tabakası oluşturma işlemidir. Şekil 3.1.'de MAO işleminin düzeneği şematik olarak verilmiştir [14].



Şekil 3.1. MAO işlemi düzeneği ve kullanılan donanım [21].

Snizko ve arkadaşları MAO'nun fiziksel ve kimyasal temellerini irdeleyerek işleminin dört farklı basamaktan oluştuğuna kanaat getirmişlerdir.[19] Bu basamaklar Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. MAO işleminin basamakları [14].

BÖLÜM 4. HAFİF ALAŞIMLAR

Mevcut metalik malzemelerin özelliklerini arttırabilmek amacıyla, toz metalürjisi ve vakum ortamında ergitme gibi yeni üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Kullanılmakta olan malzemelerin yüzey kalitelerinin arttırılabilmesi için lazer, fiziksel ve kimyasal kaplamalar gibi yeni yüzey işleme yöntemleri geliştirilmiş olup yeni alaşımlamaların yapılmasıyla daha üstün özelliklere sahip yeni metalik malzemeler elde edilmiştir. Yeni malzemelerin üretilmesi için malzemelerin üretimi sırasında malzemelere atomik seviyede müdahalelerin yapılmasıyla malzeme yapısı kontrol edilebilerek istenilen tokluk, kırılgenlik, sertlik ve korozyon direnci gibi fiziksel ve kimyasal özellikler oluşturulabilmektedir. Niyobyum, vanadyum ve titanyum ile mikro alaşımlama yapılmış çelikler, dubleks paslanmaz çelikler, kobalt, nikel ve titanyum bazlı süper alaşımlar, alüminyum ve lityum alaşımları gibi ileri hafif alaşım malzemeler oluşturulmuştur. Ayrıca Al ve Mg alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki uygulamaları, düşük yoğunlukta geliştirilmiş olan Al ve Li alaşımlarının havacılık endüstrisindeki uygulamaları ileri metalik malzemelerin günlük hayatımıza girişine örnektir. Sinterleme, sıcak presleme, toz metal enjeksiyonu gibi yöntemlerle metal tozları sıkıştırılır ve yüksek özelliklere sahip malzemelerin elde edilebilmesi sağlanır. Toz metalürjisi olarak adlandırılan imalat teknolojisinin kullanılmasıyla ileri metalik malzemelerin elde edilmesi sağlanabilmektedir. Benzer olarak vakum yöntemiyle ergitme işlemiyle yüksek özelliklere sahip magnezyum alaşımlı parçaların üretilmesiyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır. Nikel ve titanyum alaşımlarında sağlanan ve şekil hafızalı alaşımlar adı verilen yeni malzemeler belirli sıcaklıklarda geometrik şekil farklılığı göstermekte olup davranışı hafızasına alarak yineleyebilmektedir. Metal esaslı kompozitler de ise matris yapısı olarak Al, Cu, Mg ve Ti gibi hafif metalleri ve alaşımları kullanırken, takviye malzemesi olarak C, boron ve diğer metallerin elyaf, parçacık ve kıl kristal biçimi kullanılmaktadır. Metal matris ve takviye malzemesinin bir araya getirilmesiyle elde edilen yeni malzemenin

dayanımı, aşınma dayanımı, korozyon direnci ve sertlik özelliklerinin geleneksel malzemelere göre daha iyi olması nedeniyle bu tür malzemeler otomotiv, gaz türbinlerinde havacılık endüstrisinde ve nükleer güç teçhizatlarında verimli bir biçimde kullanılabilmektedir [20]. Hafif metal malzemelerine ait uygulama örneklerinin bazıları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Hafif metallere ait uygulama örnekleri [20].

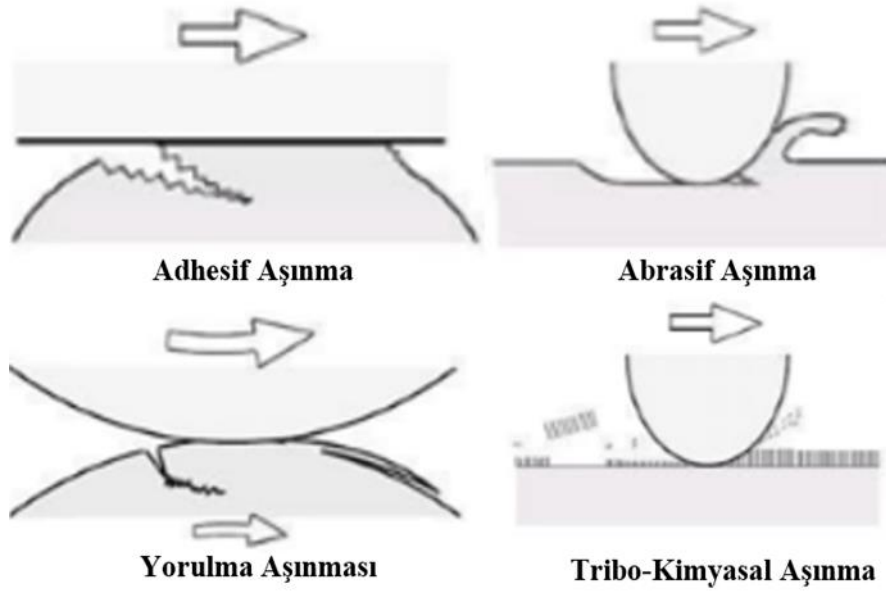
Uygulamanın Konusu	Malzeme	Uygulamanın örneği
Mekanik işlemler		
Yüksek dayanım	İnce ve tek kristalli alaşımlar	Havacılık ve uzay ekipmanları
Süper plastiklik	Süper plastik Alüminyum alaşımları	Havacılık
Titreşim söndürme	Magnezyum serisi, Magnezyum bakır serisi	Titreşime dayanıklı malzemeler
Isıl İşlemler		
Isıl dayanım	Nikel bazlı alaşımlar, kobalt bazlı alaşımlar	Gaz türbinleri, tüpler
Elektriksel işlemler		
Süper iletkenlik	Niyobyum ve Titanyum, Niyobyum ve Kalay	Nükleer reaktörler
Yarı iletkenlik	Amorf silikon	Güneş pili, algılayıcı
Manyetik işlemler		
Yüksek manyetizma	Samaryum, Kobalt	Manyetik kayıt, Kobalt
Yüksek manyetik geçirgenlik	Amorf alaşımlar	Transformer çekirdekleri, manyetik kafalar, elektrik motorları
Diğer işlemler		
Hidrojen soputma	Demir titanyum	Hidrojen araçları
Süper hızda elektron hareketi	Galyum-Arsenit	Süper yüksek hızda devre
Şekil hafıza	Nikel-Titanyum	Kapak, yapay protezler

BÖLÜM 5. AŞINMA

Aşınma, başka bir yüzeyle temas halinde bulunan yüzeyde tribolojik sistem nedeniyle oluşan talaşların neden olduğu zarara denir. Farklı bir ifade ile dış etkenler altındaki temas yüzeyinde meydana gelen fiziksel değişimlere denir. Aşınma, bozulmalara neden olabileceği gibi yüzey pürüzlülüğün ve toleransların yok olmasına, yorulmayla bileşenlerin bozulmasına sebep olabilir. Ayrıca iş parçası malzemesinde meydana gelen aşınma iki iş parçasının bağıl hareketinin doğal karakteristiğidir. Şekil 5.1.'de bazı aşınma örnekleri şematik olarak verilmiştir. Parça gövdesinin bir diğerinin üzerinde hareket etmesi sonucunda oluşan aşınmaya kayma aşınması denir. Parçalardan birinin diğerinin üzerinde dönmesiyle oluşan aşınmaya dönme aşınması denir. Her iki hareketin eş zamanlı uygulanmasıyla dönme-kayma aşınması meydana gelir. Çok küçük değişimler ile karşılıklı olarak kayma oluştuğunda meydana gelen aşınma tipine aşındırma adı verilmektedir [21].

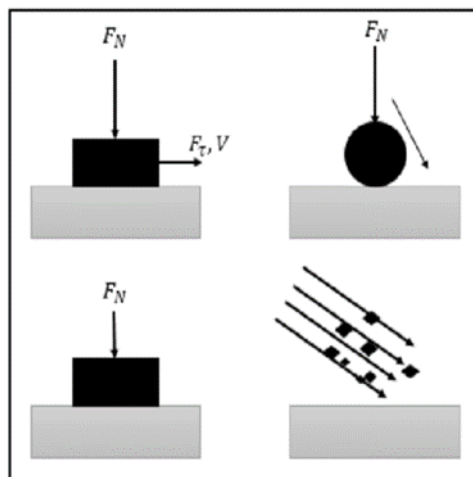
Malzemelerden herhangi birisi kendisinden yumuşak olan malzemeyi ihtiva ettiği sert partiküller yardımıyla aşındırıyor ise buna abrazyon adı verilir. Eğer bu aşındırıcı malzeme bir sıvı taşıyor ise bu aşınma biçimine erozyon adı verilir. Aşınma hasar oluşumu ve aşınma mekanizması hareketlerinin baz alınmasıyla dört ana karakterde adlandırılabilir;

1. Adhesif aşınma,
2. Tribo-oksidatif aşınma,
3. Abrasif aşınma,
4. Yorulma aşınmasıdır.



Şekil 5.1. Aşınma mekanizmaları [22].

Bu dört temel aşınma mekanizmasının doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için tüm aşınma aşamalarının kontrolü önemlidir. Bu kontrol hareketli aşınma mekanizması tanımlanabilmesinin mümkün olduğu tasarım sürecinde yapılabilir. Şekil 5.2.'de parçalar arasındaki bağıl hareket örnekleri verilmiştir. Ayrıca aşınma nedeniyle oluşan hatadan sonra, tribolojik sistemin yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulduğunda sonradan da gerçekleştirilebilir [21].



Şekil 5.2. Parçalar arasındaki bağıl hareket örnekleri.

5.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, yapışma kuvvetlerinin temas pürüzlülükleri arasında bağlanma sonucu oluşur. Adhesiv aşınma esnasında, yüzey pürüzlülüklerinin birbirlerine kaynamasıyla bağlantı yerlerinden kopmalar oluşur. Kopan parçacıklar iki yüzeyin arasında yeni temas alanlarının meydana gelmesini sağlamaktadır. Kopan parçaların birbirleri ile olan temaslarının artması ile bu parçalar toplanarak kayan iki yüzeyin arasında hareket eder, iki yüzeyin arasında büyüyen bu parçalar yükün etkisiyle de levha haline gelir. Adhesiv aşınma sünek ve kırılğan malzeme aşınmalarının ayırt edilmesinde yararlı olmaktadır [23].

5.1.1. Sünek malzemelerde adhesiv aşınma

Sünek malzemelerde, dönüş sırasında temas eden pürüzlülüklerde plastik bağlantılar meydana gelir. Adezyon kuvveti bazı durumlarda ana gövdeden daha dirençli bir bağlantı meydana getirebilir. Bunun sonucunda, bazı pürüzlülüklerdeki teğetsel yer değiştirmeler sebebiyle pürüzlülükler yerine ana kütlede kesilmelere sebep olabilir. Şekil 5.3.'de toplam aşınma hacmi verilmiştir [21].

$$W_r = \Delta m / (l \cdot \rho \cdot F) \quad (2.1)$$

W_r : Aşınma oranı (mm^3/Nm)

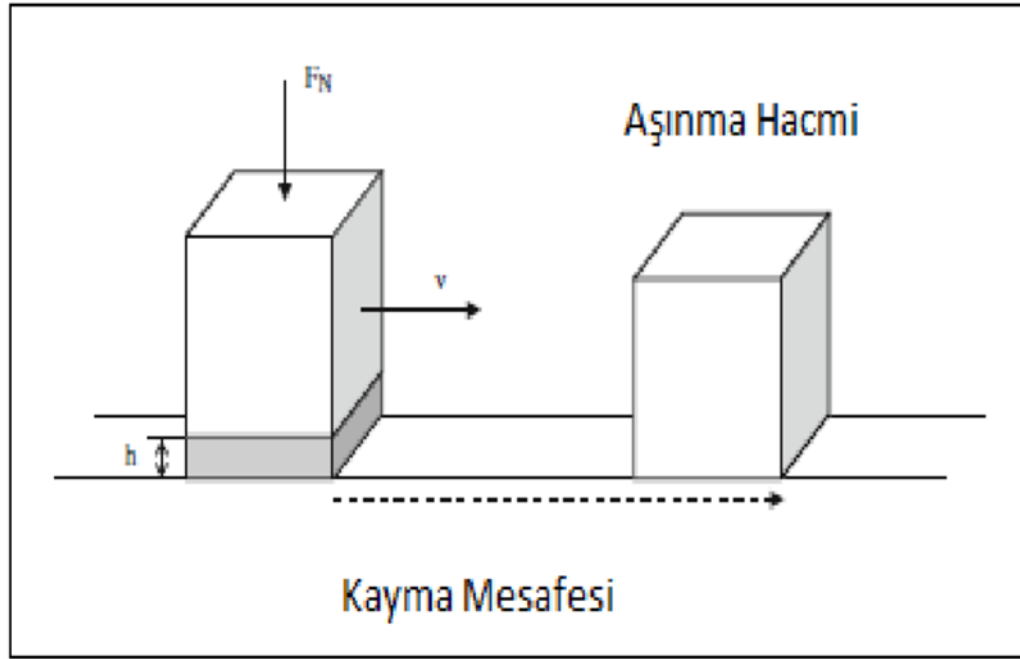
Δm = Test esnasında toplam kütle kaybı (gr)

ρ = Test malzemesinin özgül ağırlığı (g/cm^3)

l = Toplam mesafe (m)

F = Pim üzerindeki normal kuvvet

Pürüzlülüklerde tekrarlanan plastik deformasyonlar sonucu yerel yorulma hasarı ya da yorulma kaynaklı plastik deformasyon birikimi oluşmaktadır. Bu aşamalar alt yüzey temas bölgeleri boyunca geniş alanlarda etkili olarak malzemenin zayıflamasına neden olur. Dolayısıyla, aşınan ufak parçalarda kritik hasarlar oluşur [23].



Şekil 5.3. İlerleme mesafesi ve aşınmanın hacmi.

5.1.2. Gevrek malzemelerde adhesiv aşınma

Gevrek malzemelerde adhesiv aşınmasının özel bir türü meydana gelir. Temas yüzeylerindeki pürüzlülüklerde oluşan adhesiv geçişleri aslında dönüş sırasında çekme gerilmesinden kaynaklanmaktadır.

5.2. Tribo-Oksidatif Wear

Tribo-oksidatif aşınma oksijen ihtiva eden bir ortamda yüzeylerin arasındaki etkileşim neticesinde oluşmaktadır. Tribo-oksidatif aşınmada temas pürüzlülüklerinde hem oksidatif hem de mekanik hareket oluşmaktadır. Genel olarak, yüzey üzerinde oksit bir katman oluşturularak, pürüzlülüklerde metal teması önlenerek oksit katmanı katı yağlayıcı gibi davranarak sürtünme ve aşınma oluşumunu azaltır [21,24].

5.3. Abrasif Aşınma

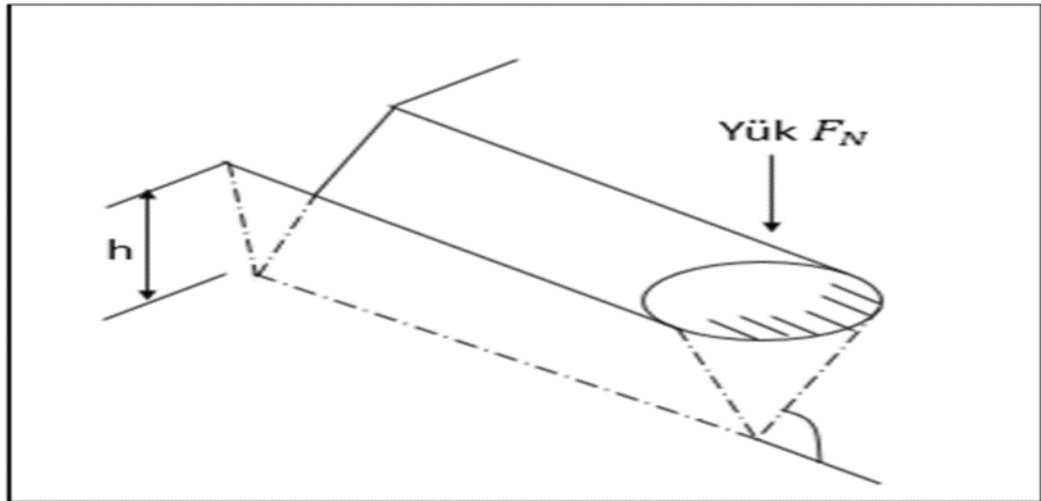
Sürtünen cisimlerin arasında tribolojik olarak daha sert olanın diğerinden parça koparma biçiminde oluşan aşınmadır. Kopma olayı farklı durumlarda bulunan

malzemelerde görülmektedir. İlk durumda, sert partikülün veya çıkıntının daha yumuşak olan karşı yüzey üzerinde plastikimsi biçimde penetre yiv açmaktadır. Abrasif sert parçacıklar malzeme ile mikro yapısal seviyede birleşebilir ya da çevreleyen ortamdan gelebilirler.

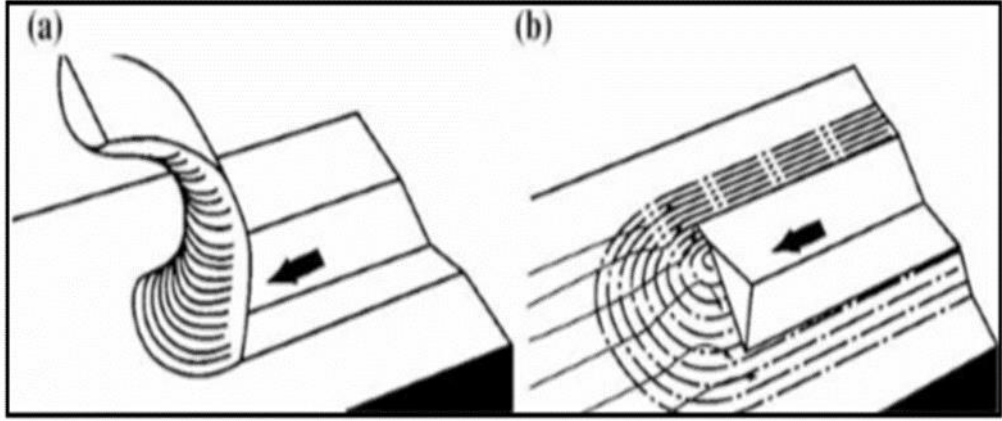
Üç parçalı abrasif aşınmada sert parçacıklar iki temas yüzeyinin arasında sıkıştıkları nedeniyle dönemedikleri için hareketleri kısıtlıdır [21].

5.3.1. Sünek malzemelerde abrasif aşınma

Şekil 5.4.'de verilen iki parçalı abrasif aşınmanın çizimi bulunmaktadır. Koninin hareketi sırasında abrasif parçacıklarının yumuşak yüzeyin üzerinde meydana getirdiği yiv verilmiştir. Tüm plastik deformasyonların kalkması durumunda aşınma “microcutting” olarak adlandırılmaktadır. Tamamı yivin kenarında meydana gelirse aşınma “microploughing” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5.5.'de her iki durum şematik olarak gösterilmiştir [21].



Şekil 5.4. İki parçalı abrasif aşınma [22].



Şekil 5.5. Abrasif aşınma [22].

5.3.2. Gevrek malzemelerde abrasif aşınma

Bu aşınmada sert ve köşeli parçacıkların hareketli kırılgan yüzeylerin üzerinde girintiler meydana getirmektedir. Daha sonra girintilerin meydana gelmesi ve yanıl çatlakların yayılmasıyla aşınma parçalarının oluşumuna neden olur. Sert parçacıklar fazla yuvarlatılmış ise temas yüzeyinde gevrek kırılmayı oluşturabilir [21].

5.4. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınmasında malzeme ilk temas noktasından itibaren kalkmaya başlayarak düz bir şekilde ilerleme yapar. Ayrıca yorulma aşınması tipik bir yorulma hatasıdır, yani döngüsel yükleme uygulamalarında bir çatlak başlayarak malzeme sonuna kadar çatlamayı sürdürür. Bu aşınma türü yük uygulanan parçanın yorulma ömrüne karşılık gelen döngüden sonra üretildiği anlamına gelmektedir [21,22].

Yorulma aşınmasında uyumsuzluk durumları söz konusudur ve en az iki parçanın birbirleri üzerindeki etkileri sonucu meydana gelir. Bu durumda aşınma mekanizması “Dönel Temas Yorulması” olarak adlandırılmaktadır. Aşınma mekanizması, temas gerilmesi, yağlayıcı rejimi, dönüş ve malzeme özelliklerinden etkilendiğinden dolayı diğer aşınma mekanizmalarına göre daha karmaşıktır.

Plastik deformasyon ve oluşan dislokasyonlara bağı olarak meydana gelen küçük boşluklu yapılarda kopma gerilmeleri maksimum seviyededir. Bu boşluklar zaman içinde yüzeye doğru ilerleyerek büyür ve yüzey sonunda küçük çukurları oluşturur. Pitting olarak adlandırılan bu aşınma türü daha çok dişli çarklarda, rulman yataklarında ve kamlar gibi dönme hareketi gerçekleştiren elemanların yüzeylerinde oluşmaktadır.

5.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

5.5.1. Esas sürtünme elemanına bağı olanlar

1. Malzeme Cinsi
2. Kimyasal Bileşim
3. Mikro Yapı
4. Hacimsel ve Yüzeysel Sertlik
5. Elastiklik Modülü
6. Akma ve Kırılma Özellikleri
7. Yüzeyin Pürüzlülüğü
8. Şekli
9. Soğuk Şekillendirmenin Durumu
10. Uygulanan Isıl İşlem

5.5.2. Karşı elemana bağı olanlar

1. Aşındırıcı Tanenin Büyüklüğü
2. Tanein Şekli
3. Tanein Dağılımı

5.5.3. Ortama bağı olanlar

1. Sıcaklık
2. Nem [21,22,24]

5.6. Aşınma Testleri ve Yöntemleri

Sürtünme katsayısı ve farklı aşınma mekanizmalarının altında oluşan aşınmanın tepkileri, malzemenin içyapısından farklı olarak tribolojik sisteme bağlıdır. Örneğin bağlantının biçimi, eşleşen malzemeler ve yüzeyin karakteristikleri gibi nedenlerden dolayı gerçekçi tribolojik davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla saha testlerinin yapılması gereklidir. Testler ardından gerçek sistemlerin üzerinde yapılmalıdır. Bunun gibi testlerin uzun süreli ve karmaşık olması, bireysel değişkenler etkisinin çıkarılması ve sonuçların yorumlanması zordur. Bu nedenle daha basit laboratuvar testleri yapılmaktadır [21]. Bunlar;

1. Tezgâh testleri,
2. Gerçek sistemden izole edilmiş tekil komponent testleri,
3. Aşınma mekanizmasını simüle eden basitleştirilmiş testlerdir.

Bu testler gerçek saha testlerine göre daha kısa süreli ve daha uygun maliyetlidir. Ayrıca test parametreleri daha iyi kontrol edilebilir ve çıkan sonuçlar daha kolay bir biçimde yorumlanabilmektedir. Basite indirgenmiş laboratuvar testlerinin en önemli yönü, bağlantı yüzey sıcaklıklarının kontrol edilebilmesidir.

Malzemelerin yüzey sıcaklıklarının farklı oluşu farklı aşınma mekanizmalarını meydana getirir. Bunun izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi önem arz etmektedir. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen veriler, doğrudan kuru yataklamalarda aşınma katsayısının hesaplanması ve dişli çarklar bulunan S-N (Stress – number of contacts) (Baskı-temas sayısı) eğrilerinin hazırlanabilmesi gibi gerçek tribolojik sistemlerinin tasarlanmasında ve düzenlenmesinde kullanılabilir.

Çeşitli test makineleri bulunmaktadır ve simüle edilebilen basite indirgenmiş testler Tablo 5.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Basite indirgenmiş tribolojik testler, ilgili aşınma işlemleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları [21, 25, 26]

Test Makinesi	Simüle Edilen Test Prosedürü	Simüle Edilen Aşınma Mekanizması
Pin-on disk	Kayma Aşınması	Adhesiv Aşınma-Tribo oksidatif aşınma
Blok-on ring	Kayma Aşınması	Adhesiv Aşınma-Tribo oksidatif aşınma
Disk - on disk	Yuvarlanma-Kayma Aşınması	Temas Yorulması / Adezyon- Tribo oksidatif aşınma
4 Top	Yuvarlanma Aşınması	Temas Yorulması
PAT	Yüksek Baskı Abrazyon	Abrasif Aşınma
Kuru-kum, kauçuk lastik	Düşük Baskı Abrazyon	Abrasif Aşınma

5.6.1. Ağırlık farkı yöntemi

Duyarlılığı nedeniyle en sık tercih edilen yöntemdir. Aşınmada kütle kaybının ölçülebilmesi için hassasiyete duyarlı teraziler kullanılmaktadır. Dezavantajı ise numunenin sürekli olarak çıkartılması gereklidir.

5.6.2. Kalınlık ölçme yöntemi

Testin yapılması öncesinde ve sonrasında kalınlık değeri ve malzeme hacminin tespit edilmesiyle aşınma miktarı $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılık ile ölçülmektedir.

5.6.3. İz değişiminin izlenmesi yöntemi

Aşınan yüzey üzerinde oluşan plastik deformasyonun geometrisinin ölçümüyle belirlenmektedir.

5.6.4. Radyo izotoplar ile ölçme yöntemi

Sürtünen yüzeylerin üzerine parçacık bombardımanının uygulanmasıyla radyoaktif duruma getirilir ve ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Yüksek hassasiyet ile yapılmaktadır.

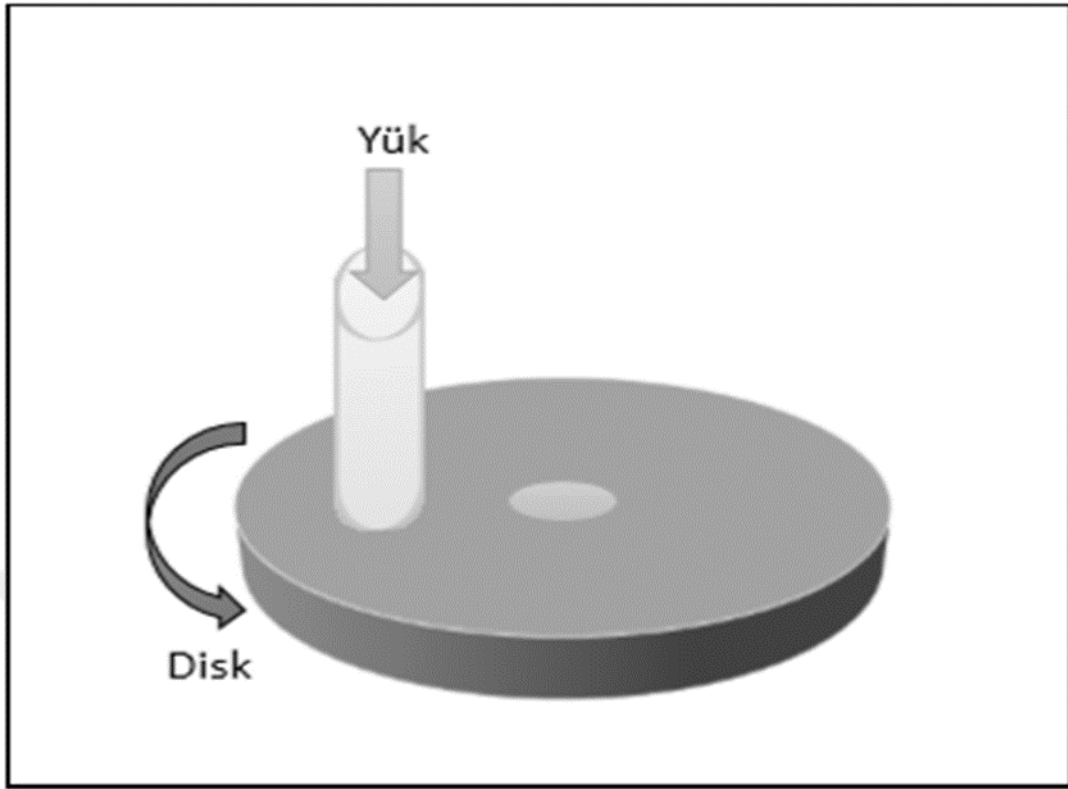
5.6.5. Aşınma testleri

5.6.5.1. Pin-on-disk testi

Bu test silindirik şekle sahip birkaç mm çapındaki pimin, dönel diske kuvvet uygulamasıyla yapılmaktadır (Şekil 5.6.). Disk ve pim arasındaki kuvvetin oluşması için gereken temas yüzeyleri uyumlu ya da uyumsuz olabilir. Temasın uyumsuz olması durumunda pim yerine küre kullanılabilir. Temasın uyumlu olduğu durumda, baskı kuvvetinde kontrol dışı etkenlere uğranılmaması için yağlayıcı testler sırasında temas yüzeyleri yuvarlatılmaktadır [26].

Temas sıcaklığı genellikle temas yüzeyinden belirli mesafede pimin üzerine yerleştirilen bir ya da iki ısı çifti ile kontrol edilmektedir. Bu noktada diskin üzerinde bulunan aşınma parçalarının her bir dönüşünde her bölgesinde pim ile teması bulunmaktadır. Diskin yeteri kadar ısı dağılımı gerçekleştiremediği durumda, sıcaklık değeri durumuna ulaşınca kadar yükselecektir. Bu durumda temas sıcaklığı beklenilenden yüksek olabilir. Transformatör kullanılarak aşınma derinliği doğrusal bir şekilde sürekli olarak kaydedilebilir. Kaydedilen derinlik diskin aşınma ölçümünde hesaplanmak üzere katkıda bulunabilir. Sıcaklığın değişimine bağlı olarak pimde oluşan sürtünme azalmalarının da transformatörün bulunduğu mesafeye göre etki edeceği dikkate alınmalıdır [21,26].

Ayrıca aşınma, her bir testin öncesi ve sonrasında veya belirli aralıklar ile pim ağırlığının ölçülmesiyle bulunmaktadır. Ana kütle kaybı aşınan malzeme yoğunluğunun kaybedilen hacme çevrilerek bulunabilir.

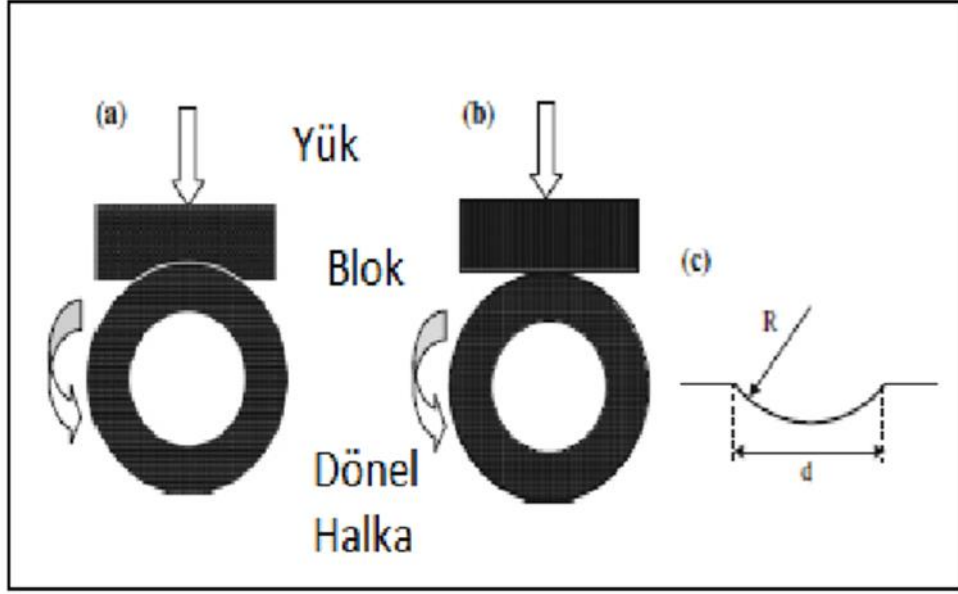


Şekil 5.6. Pin-on disk testinin şematik gösterimi.

5.6.5.2. Blok-on-ring

Sabit bir bloğun, dönel bir halka üzerine baskı uygulamasıyla gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.7.). Bu test pin-on-disk testiyle benzerlik göstermektedir.

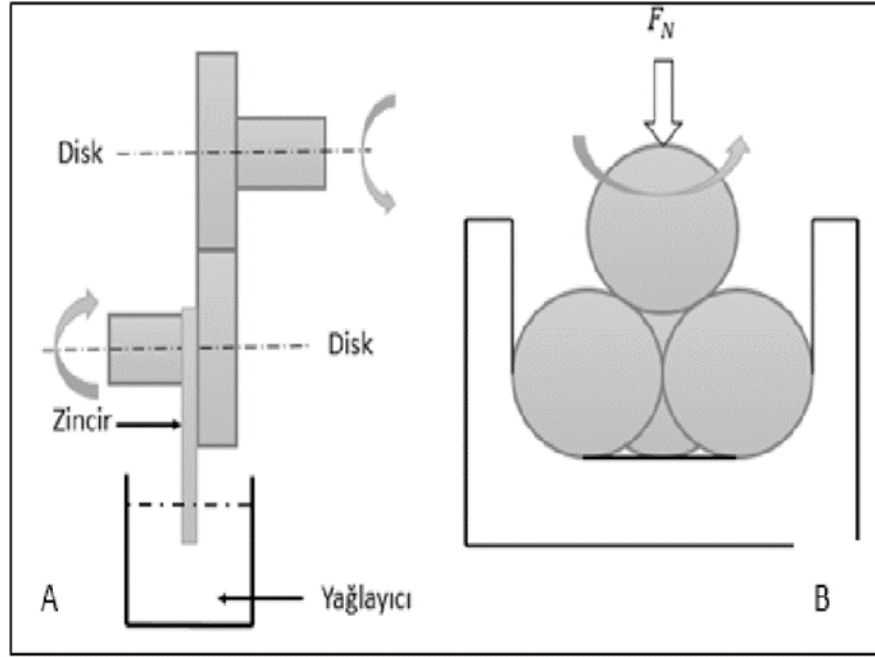
Genelde nominal temas yüzeyinin büyük, dönel uyumlu temas ve talaşların temas alanından uzaklaştırılmasının mümkün olduğu aşınmaların simüle edilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca bu tip testler sürtünme olgusunu ihtiva eden, uyumsuz konfigürasyonlarda oluşan aşınmayı ölçmek için kullanılırken yüksek basınç temas yüzeyinin elde edilmesini sağlamaktadır. Uyumlu temas halinde, bloğun ve halkanın arasında oluşan hiza sorunlarını absorbe edebilmek için uzun süreli testler yapılmalıdır. Aşınma miktarı her bir bloğun ve halkanın ağırlığının ölçülmesiyle hesaplanabilir [21].



Şekil 5.7. Blok-on-ring testinin şematik gösterimi.

5.6.5.3. Disk-on-disk

İki diskin ana doğru üzerinde uyumsuz bir temas alanını oluşturacak biçimde temas etmektedir (Şekil 5.8.). Dönme hızları değiştirilerek, yuvarlanma-kayma testleri, farklı yüzeylerde gerçekleştirilebilir. Bu test yapılırken ortam kuru ve yağlamalı olabilir. Bu test ile genelde değme yorulmasının testi yapılır. Test şartları değiştirilerek farklı lambda faktörü ve Hertzian basınç değerinin ölçümü yapılabilir. Kaplanmış numunelerin kullanılmasıyla, iş parçaları arasında temas noktası elde edilerek temas basınçları sağlanır. Yorulma hasarı başlangıcı kaydedilen sürtünmenin katsayısı ya da gürültüsü ve oluşan titreşimin görünümüne göre belirlenmektedir [21,23].



Şekil 5.8. Disk-on-diski testinin şematik gösterimi.

5.6.5.4. Pin abrazyon aşınma testi (PAT)

Pin abrazyon aşınma testinde iş parçası malzemelerinin yüksek gerilmeli abrasif hareketleri incelenmektedir. Bu testte silindirik bir pim seramik partikül ihtiva eden bir abrasif kâğıda karşı dönmektedir. Aşınan iş parçalarının ve aşınma talaşının arasındaki etkileşimin önüne geçilmesi için spiral bir parça numunenin diskin ortasına doğru hareketlendirilir. Bu testte aşınma değişimi, sistemin sürekli durdurulması ve pim ağırlığının ölçülmesiyle bulunmaktadır [26].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanı amacı farklı çözelti parametrelerinde kaplanan Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerine ve aşınma dayanımına etkisinin araştırılması. Bu çalışmada kullanılan altlık malzememiz olan, Ti6Al4V titanyum alaşımının kimyasal bileşimi ve Ti alaşımının mekanik özellikleri sırası ile Tablo 6.1. ve Tablo 6.2.'de sırası ile verilmiştir.

İlerleyen kısımda kaplama parametreleri hakkında daha detaylı bilgi verilecektir.

Tablo 6.1. Ti6Al4V kalite titanyum alaşımının kimyasal bileşim aralığı.

Kimyasal Bileşim (%)						
Ti	Al	V	Si	Mn	Fe	Nb
89,45	6,20	4,14	0,02	0,01	0,14	0,04

Tablo 6.2. Ti6Al4V kalite titanyum alaşımının mekanik özellikleri.

Malzeme	Akma Mukavemeti (MN/m ²)	Çekme Mukavemeti (MN/m ²)	Kopma anındaki uzaması	Vickers Sertlik (Hv)	Elastik Modülü (GN/m ²)	Yorulma Limiti (GN/m ²)
Ti6Al4V	970	1000	12	-	121	-

6.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması İşlemi

Altlık olarak kullanılan Ti6Al4V numunesi 3 x 20 x 50 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Daha sonra 180 - 1000 mesh aralığında SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Saf su ile yıkama işlemleri sonrasında MAO işlemi için hazır hale getirilmiştir.

6.2. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi

MAO kaplama işlemleri, 25 kW gücünde bir dış kaynağına sahip bir kaplama ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ünite voltaj aralığı 0 ile 600 volt aralığında değişebilmektedir. Kaplama süresinde kaplama kabini homejenliği sağlanması açısından sürekli karıştırılmış ve bir soğutma kabini yardımı ile kaplama çözeltisi sıcaklığı 30 °C de sabit tutulmuştur.

Mikro ark oksidasyon işlemi, sabit voltaj ve akım değerlerinde beş dakika eşit kaplama süresinde kaplanmıştır. Değişken olarak sadece kaplama banyo bileşimi değiştirilmiştir.

Farklı, miktarlarda hazırlanan $C_4H_8CaO_5$, Na_3PO_4 ve $AgNO_3$, esaslı elektrolit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama parametreleri Tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 6.3. Kullanılan çözelti miktarları, voltaj ölçümleri, pH değerleri ve işlem süresi

Örnek Adı	$C_4H_8CaO_5$ (g/L)	Na_3PO_4 (g/L)	$AgNO_3$ (g/L)	Voltaj (V)	Süre (dk)	pH
Ti-4Ca-4P	4	4	-	480	5	11.5
Ti-6Ca-4P	6	4	-	480	5	11.5
Ti-8Ca-4P	8	4	-	480	5	11.0
Ti-10Ca-4P	10	4	-	480	5	10.0
Ti-4Ca-4P-1Ag	4	4	1	480	5	11.5
Ti-4Ca-4P-3Ag	4	4	3	480	5	11.5
Ti-4Ca-4P-5Ag	4	4	5	480	5	11.5

Elektrolitin başlangıç pH değeri ve voltajları ölçülüp sırasıyla Tablo 6.3.'de verilmiş olup, elektrolit sıcaklığı tüm işlem süresince 30°C'de tutulmuştur.

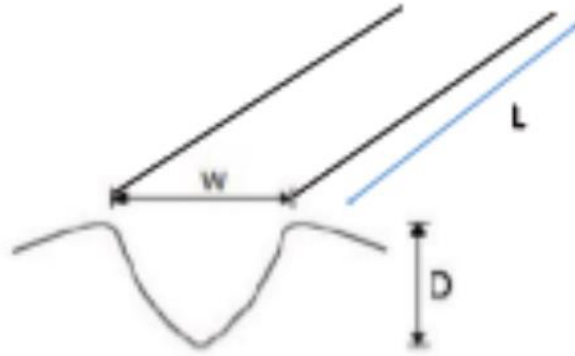
6.3. Yüzey Karakterizasyonu İçin Yapılan Analizler

Mikro ark oksidasyon işlemi sonrasında numune yüzeylerinin yüzey karakterizasyonları ve morfolojik yapıları JOEL – 6060 LV marka taramalı elektron

mikroskobu (SEM) ve Enerji difraksiyon spektrometresi (EDS) kullanılarak yapılmıştır. Faz analizleri için Rigaku marka X-Işını difraktometresi kullanılmıştır. Cihaz 25 kV güç değerlerinde ve numune yüzeyinin 0.2° 'lik artışlarla $2\theta = 10 - 90^\circ$ arasında taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. CuKa tüpü kullanılmıştır.

6.4. Aşınma Deneyleri

Mikro ark oksidasyon işlemiyle numune yüzeylerinde oluşturulan tabakaların lineer aşınma (reciprocating wear) yapılmış ve bu deneyler , “csm Instruments TRIBOMETER” marka aşınma cihazı kullanılarak kuru ortamda ball on disk deney düzeneği ile yapılmıştır. Ortam sıcaklığı 25°C ve nem $60\% \pm 2\%$ olarak belirlenmiştir. Aşındırıcı bilya olarak 6mm çapında alümina bilya kullanılmıştır. Deneyde parametrelerin de 0,5- 1 – 2 N yükler değişken olarak belirlenmiş, aşınma hızı 0,10m/s ise sabit tutulmuştur. Toplam kayma mesafesi 50 m olarak uygulanmıştır. Aşınma testi sonucu oluşan ve aşınma oranını belirlemek amacı ile oluşan iz hacmi ölçülmüştür. Hacim hesabi için iz genişliği (W) SEM ile ve derinliği (D) 2D profilometre kullanılarak hesaplanmıştır. Aşınma hacim eşitliği için 6.1 Eşitliği kullanılmıştır. İzin şematiksel görüntüsü Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Aşınma izi şematik görünüşü

$$A = \pi/4 W.D \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'de

A: Aşınma iz hacmi,

W: Aşınma izinin genişliği,

D: Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.

Hesaplana alan sonucunu lineer olarak belirlenen yol mesafesi (L) ile çarpılarak hacim hesabına geçilmiştir.

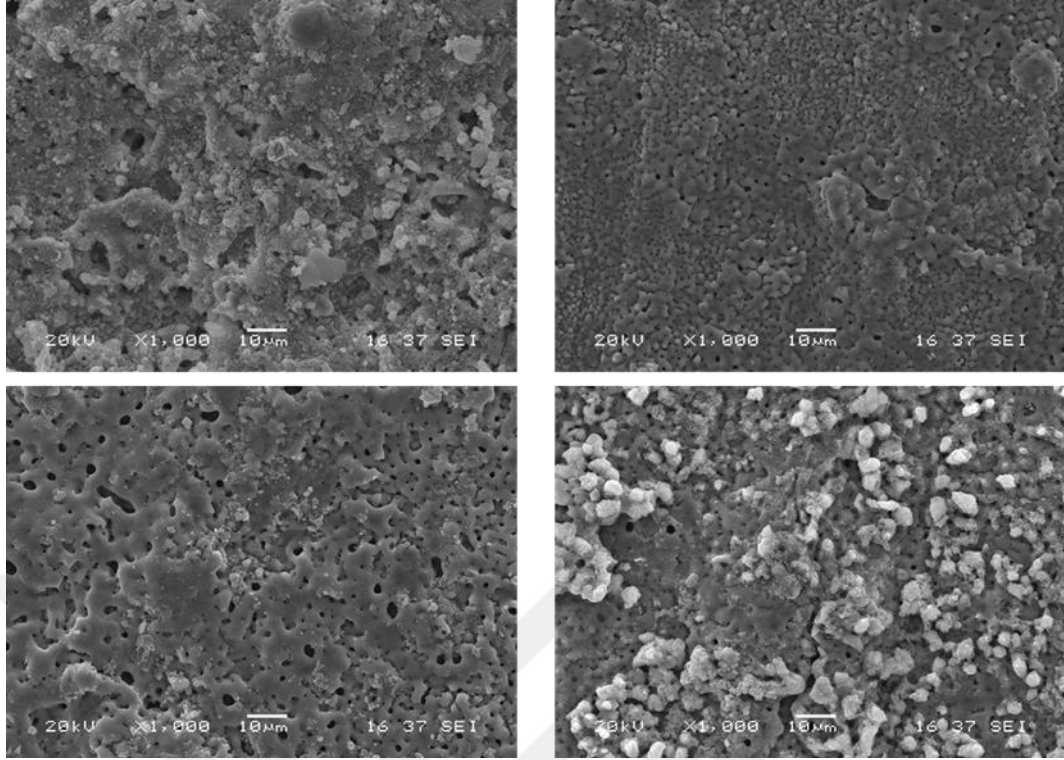


BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

7.1. SEM Görüntüleri

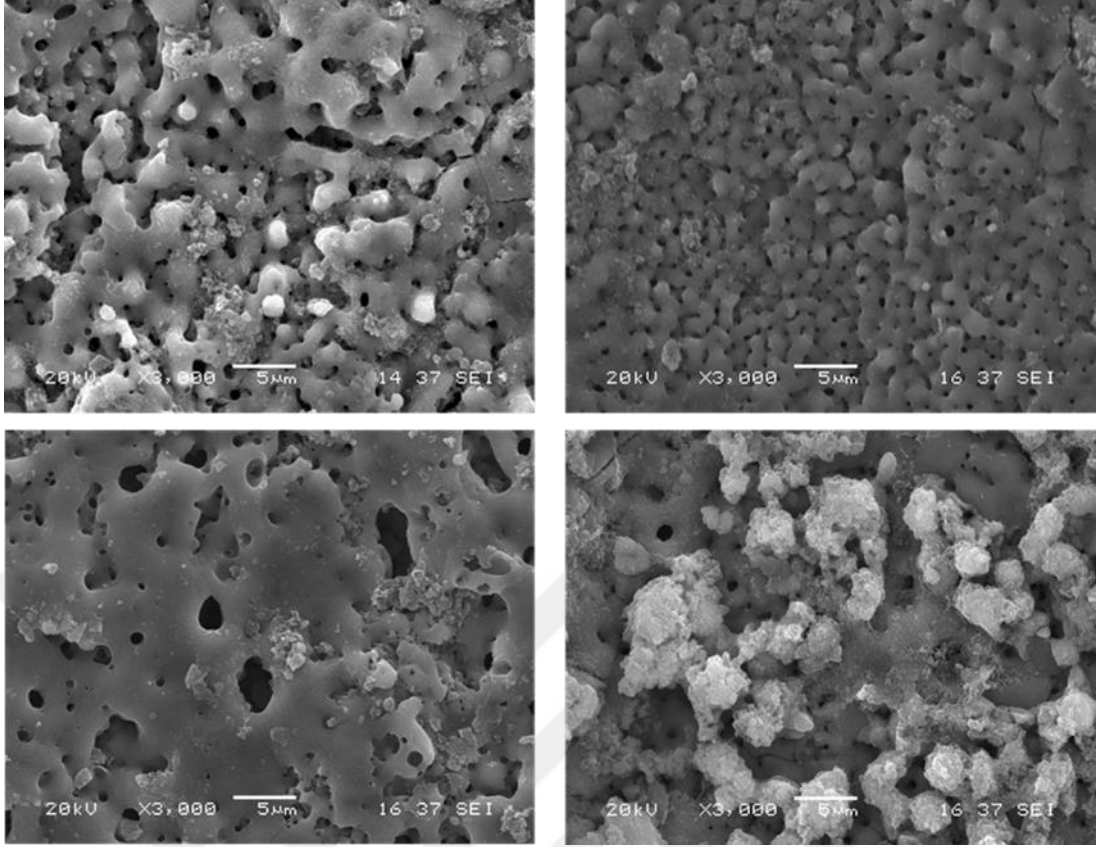
MAO kaplama sonrası numune yüzeylerinde meydana gelen değişimleri görebilmek için numunelerin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri alınmıştır.

Şekil 7.1.'de sırası ile Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin X1000 büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen kaplama görüntüleri nihai mikro ark oksidasyon kaplaması yüzey görüntüsüne benzemektedir. MAO prosesinin doğasından kaynaklanan mikro boşalmalara (microdischarge) bağlı olarak altlık malzeme üzerine büyütülen kaplamaların pürüzlü bir yüzeye, değişik boyutlarda çok sayıda mikro porlar ve mikro ergimelerin neden olduğu volkan görünümlü oluşumlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak alınan SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere kaplama yüzey görüntüsünde çözelti bileşimi değişimi ile farklılıklar meydana gelmiştir. Artan $C_4H_8CaO_5$ çözeltisi ile yüzeyde oluşan mikro porların çaplarının küçüldüğü görülmüştür. Ti-10Ca-4P için ise yüzeyde tekrardan bir kabalaşmaya sebep olduğu görülmüştür.



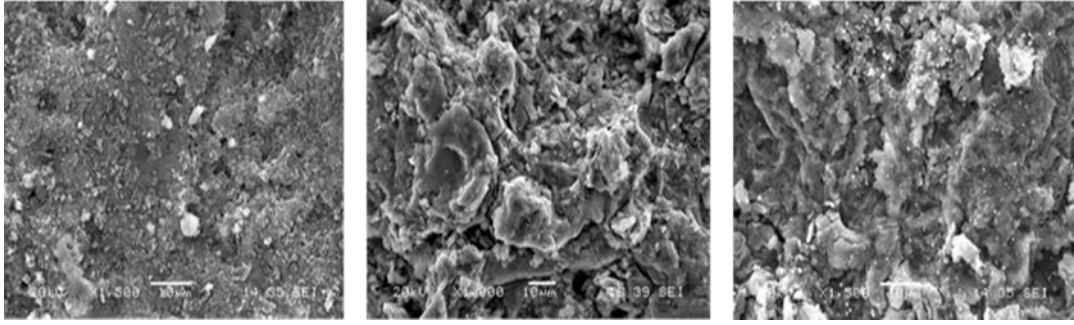
Şekil 7.1. MAO kaplama sonrası düşük büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P b) Ti-6Ca-4P (c) Ti8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P -

Yüzeyi daha net bir şekilde analiz edebilmek için aynı numunelerin yüksek büyütmelerde ki SEM görüntüleri Şekil 7.2.'de verilmiştir. Alınan SEM görüntüleri % 6 g/lt'den % 8 g/lt'e artan $C_4H_8CaO_5$ yüzdesi ile yüzeydeki mikro porların küçüldüğü daha net olarak görülmektedir. %10 g/lt $C_4H_8CaO_5$ ilave edilen Ti-10Ca-4P kodlu numunede ise kaplamada dökülmeler meydana gelmiştir. Artan çözelti yüzdesi ile kaplama banyosu PH oranı azalma göstermiştir. Literatüre göre, [27,28] daha homojen ve mukavemetli olması için PH değeri 10 ve üzeri olması tercih edilmektedir.

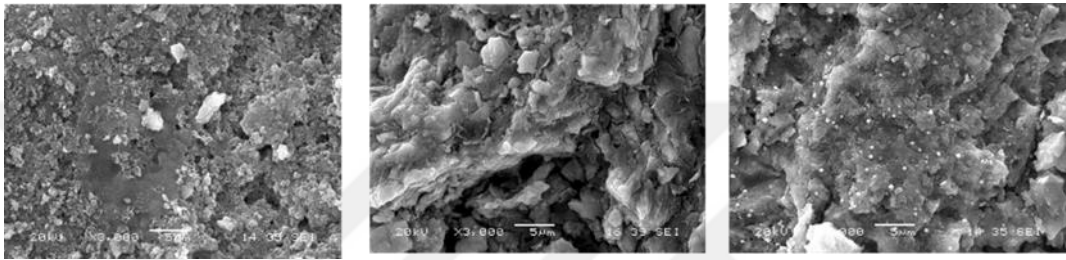


Şekil 7.2. MAO kaplama sonrası yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P

Şekil 7.3. ve Şekil 7.4.'de sırası ile gümüş nitrat ilave edilen MAO kaplamaların düşük ve yüksek büyütmelerdeki SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir. İlave edilen gümüş çözeltisi (%1, %3 ve %5 g/l) ile yüzeyde ki mikroporların azaldığı ve neredeyse tamamen kapandığı görülmektedir. Ortalama 1-3 μ m civarında olan mikro porların neredeyse tamamının yok olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü artan çözelti konsantrasyonu ile de azalmıştır. Artan çözelti konsantrasyonu kaplama kalitesi ve deşarj karakteristiği açısından önemli bir parametredir [28-30]. Çözelti konsantrasyonunda ki artış ile çözelti iletkenliği artmış (gümüş iletkenliği yüksek olması sebebi ile) olacağından, artan iletkenlik büyüme hızını iyileştirir. Mikropor çapları ergimiş oksit miktarının artışı ile daha yoğun bir kaplama tabakası oluşturur. Artan iletkenlik ile mikroporların azalması ve çaplarının küçülmesi ile daha yoğun bir tabaka elde edilmesi literatüre göre de beklenen bir sonuçtur [31.32].



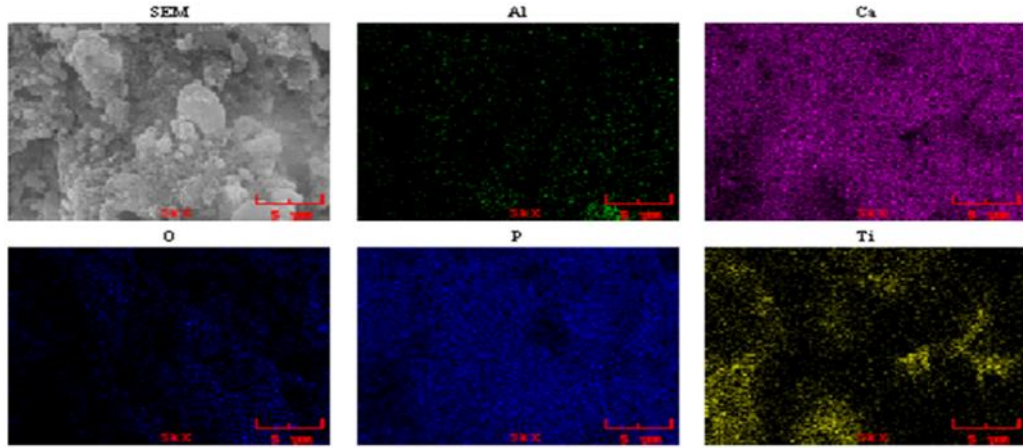
Şekil 7.3. MAO kaplama sonrası düşük büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P-1Ag b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag



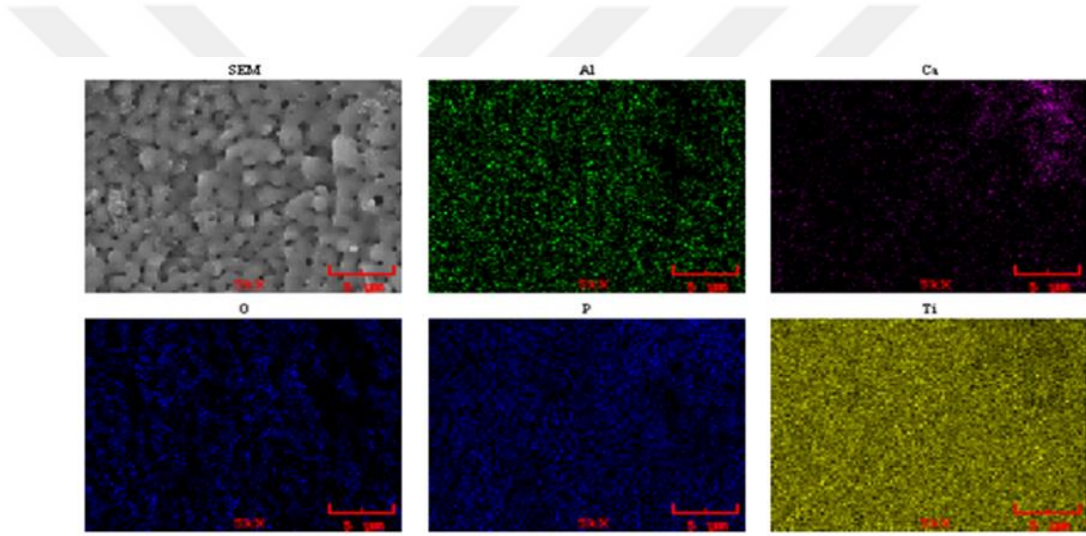
Şekil 7.4. MAO kaplama sonrası yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri (a) Ti-4Ca-4P-1Ag b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag

7.2. EDS Analizleri

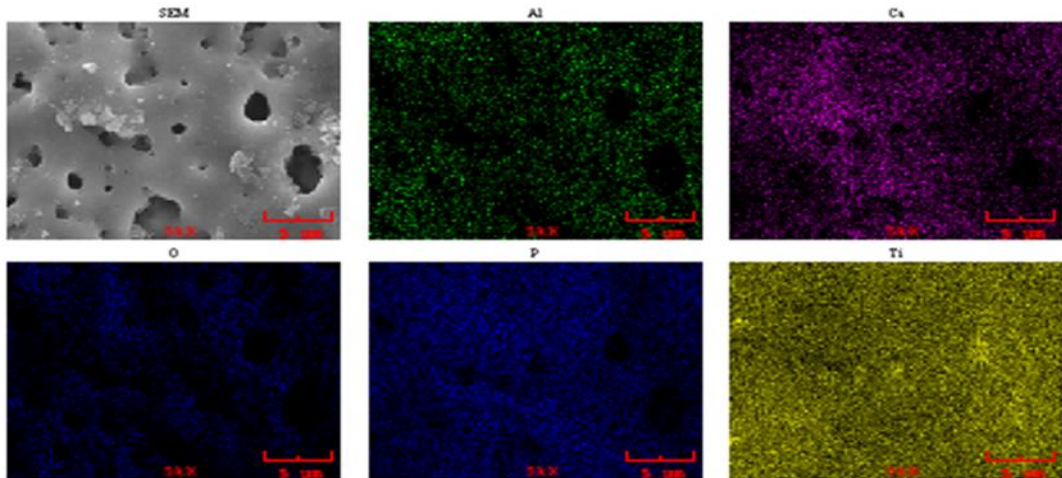
Şekil 7.5., Şekil 7.6., Şekil 7.7. ve Şekil 7.8.'de sırası ile Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin SEM görüntüleri ile EDS-MAP analizleri verilmiştir. Alınan EDS analizi sonrası yüzeyde Ti, Al, O, Ca, P elementlerine rastlanmıştır. Ti ve Al elementleri altlık malzemedendirken yüzeyde tespit edilen diğer elementler ise çözeltiden gelmektedir. Yüzeyde Ti ve O'nin aynı yerlerde dağılım göstermesi kaplamanın titanyum oksit olma ihtimalini kuvvetlendirmektedir. Bu oluşum ile ilgili detaylı bilgi ilerleyen kısımda XRD analiz sonuçlarının verildiği bölümünde açıklanacaktır.



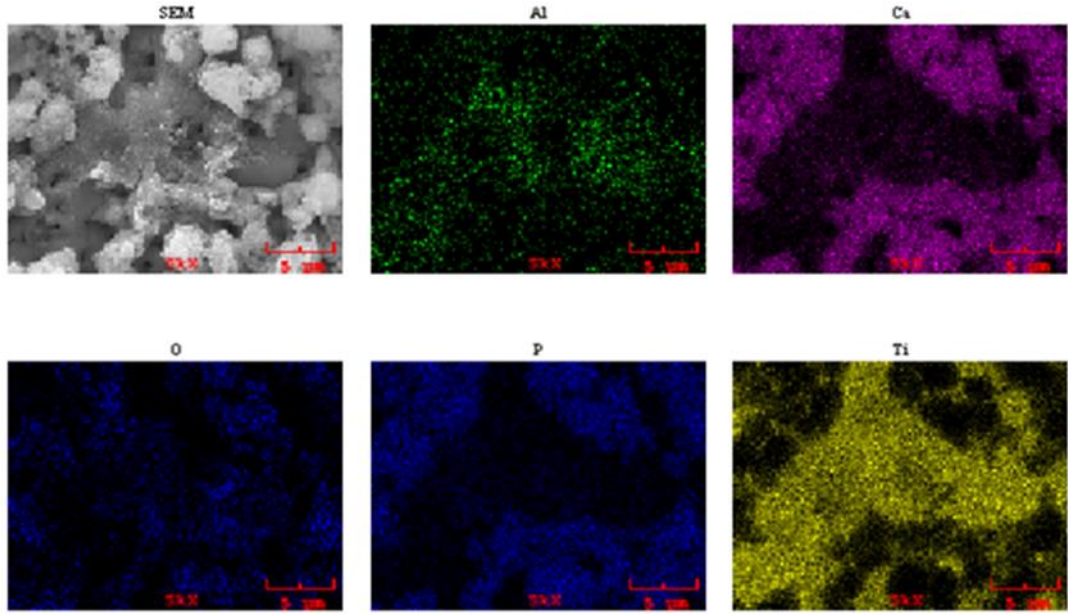
Şekil 7.5. Ti-4Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi



Şekil 7.6. Ti-6Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi

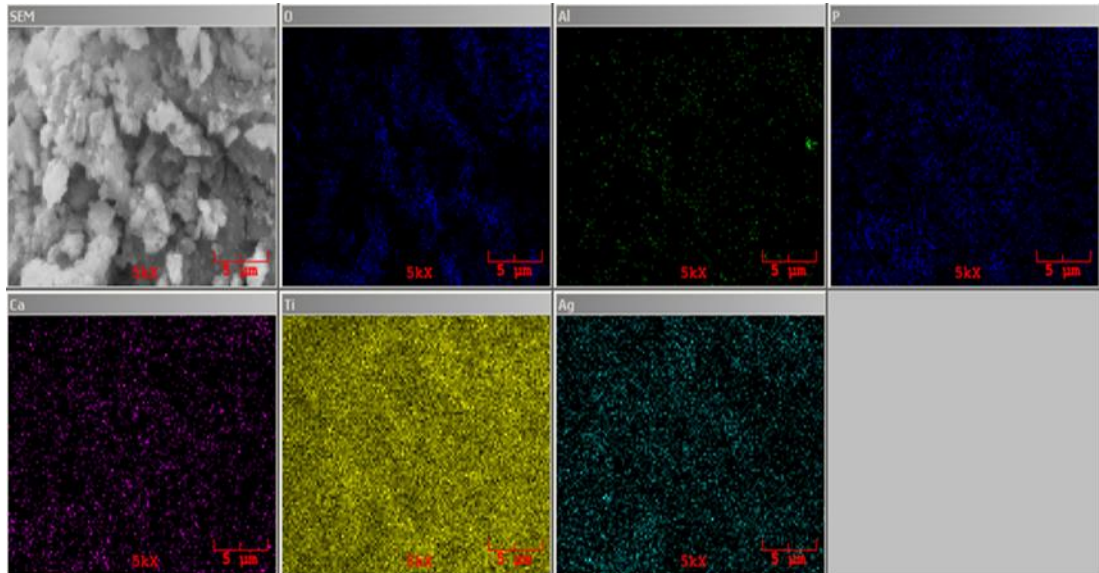


Şekil 7.7. Ti-8Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi



Şekil 7.8. Ti-10Ca-4P kodlu numunenin MAO kaplama sonrası SEM görüntüsü ve MAP Analizi

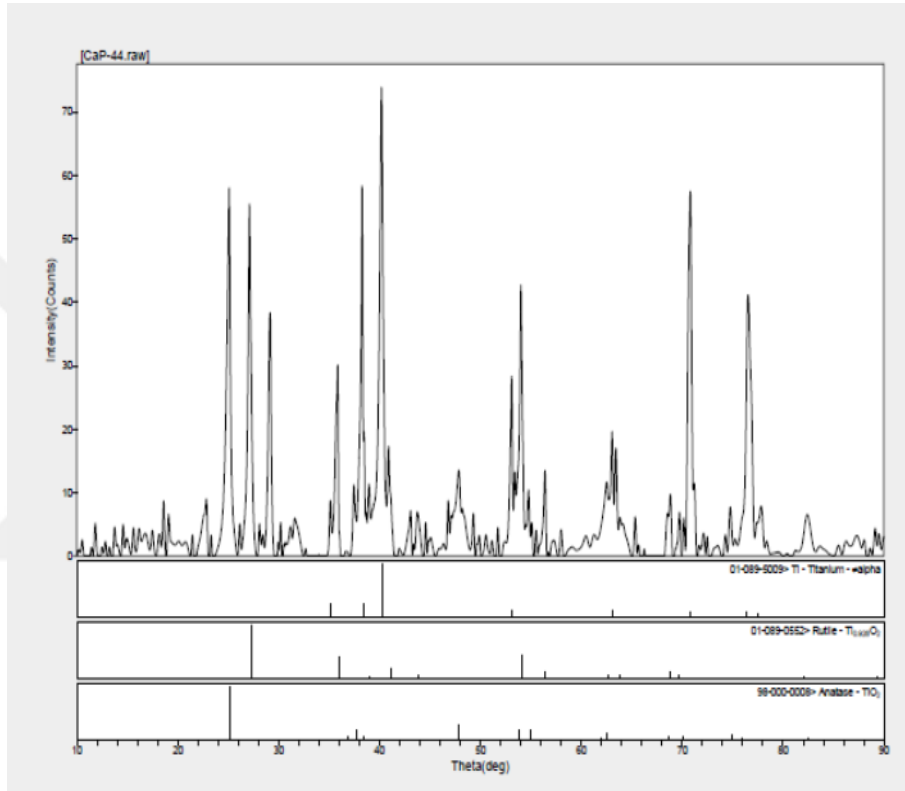
Şekil 7.9.'da %3 g/lt gümüş nitrat ilave edilen numunenin SEM ve EDS-MAP analizi verilmiştir. Alınan analiz sonrasında yüzey de gümüş ile beraber benzer elementlere rastlanmıştır. Gümüş elementi yüzeyde homojen dağılım göstermiştir.



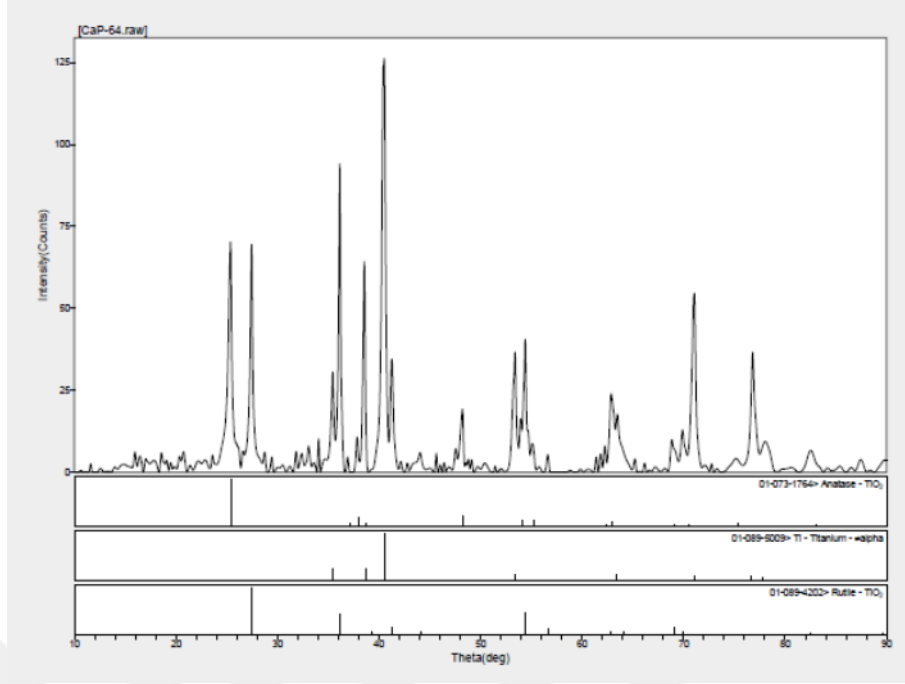
Şekil 7.9. Gümüş nitrat ilave edilen Ti-4Ca-4P-3Ag kodlu numunenin SEM görüntüleri ile EDS-MAP analizleri verilmiştir.

7.3. XRD Analizleri

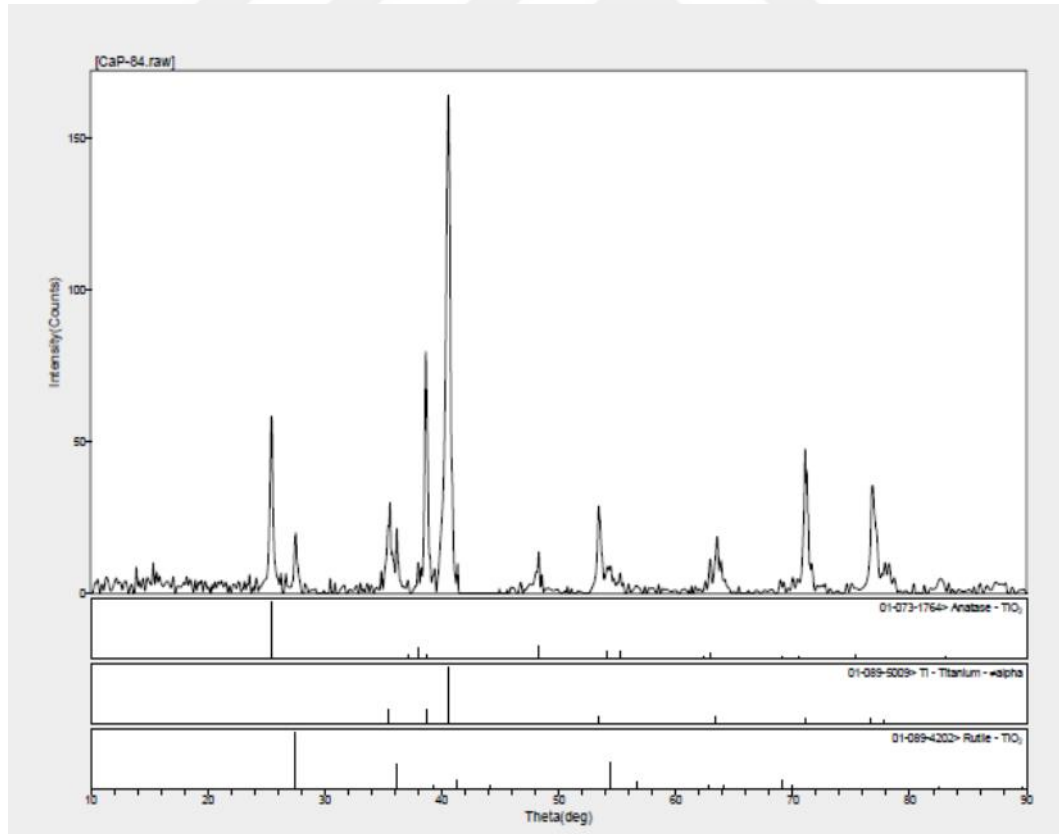
Şekil 7.10., Şekil 7.11., Şekil 7.12. ve Şekil 7.13.'de sırası ile Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P ve Ti-10Ca-4P numunelerinin XRD analizleri verilmiştir. Alınan XRD Analizi sonrası Rutil, Anataz ve Hidroksiapatite rastlanmıştır. Hidroksiapatit artan Ca konsantrasyonu sonrasında oluşmuştur.



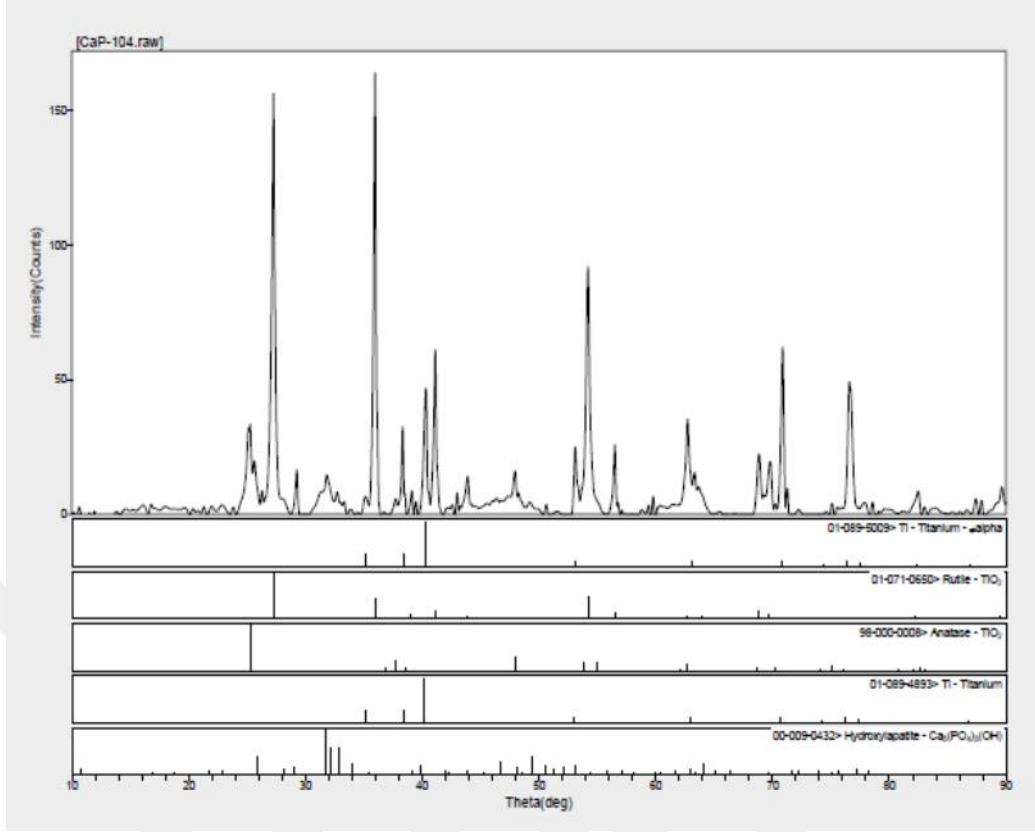
Şekil 7.10. Ti-4Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.



Şekil 7.11. Ti-6Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.



Şekil 7.12. Ti-8Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.



Şekil 7.13. Ti-10Ca-4P kodlu numunenin XRD analizi.

7.4. Aşınma Deneyleri Sonuçları

MAO ile kaplanan numunelere CSM lineer aşınma cihazı ile 50 m yol için 0.10 m/sn hızın da 0.5, 1 ve 2 N yükler için aşınma deneyi uygulanmıştır. Deneyler esnasında hava sıcaklığı ortalama 30°C'dir. Nem oranı %50-60 civarındadır.

Aşınma deneyleri sonrası her numunenin aşınma hız değerlerini hesaplamak için öncelikle aşınma izlerinden aşınma hacimleri bir önceki bölümde açıklanan eşitlik kullanılarak aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerden ise aşınma hızları hesaplanarak grafikler ile sonuçlar toplanmıştır.

7.4.1. Aşınma hacmi değerleri

Aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izinin, profilemetre yardımıyla derinlikleri ölçülmüş ve SEM ile de iz genişlikleri ölçülmüştür. Alınan bu değerler neticesinde

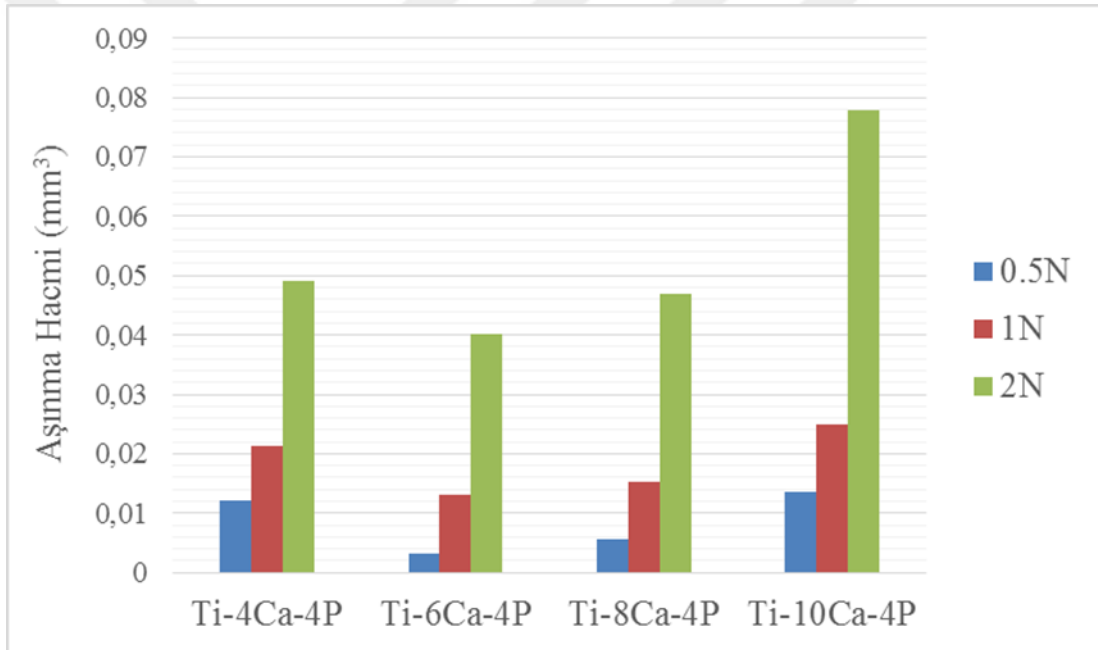
aşınma alanı ve aşınma hacmine geçiş yapılarak, tüm numunelerin değerleri eşitlik 6.1.'de eşitliğin yerine yazılarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerler Tablo 7.1.'de verilmektedir. Aşınma dayanımlarında yüzey pürüzlülüğünün maksimum etkinlikte olduğu bilinmektedir. Aynı numune parametrelerinden minimum bileşimi ile kaplanan Ti-4Ca-4P ile Ti-4Ca-4P-1Ag numuneleri aşınma testi öncesi yüzeyleri parlatılarak mekanik teste tabii tutulmuşlardır. Alınan sonuçlar Tablo 7.1.'de en alta eklenmiştir.

Tablo 7.1. Aşınma testi sonrası numunelerin aşınma alanı ve hacmi değerleri

Numune no	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Aşınma Alanı (mm ²)	Aşınma Hacmi (mm ³)
Ti-4Ca-4P	0,15	50	0.5	1224	12,24x10 ⁶
Ti-4Ca-4P	0,15	50	1	2130	21,3x10 ⁶
Ti-4Ca-4P	0,15	50	2	4900	49x10 ⁶
Ti-6Ca-4P	0,15	50	0.5	312	3,12x10 ⁶
Ti-6Ca-4P	0,15	50	1	1316	13,16x10 ⁶
Ti-6Ca-4P	0,15	50	2	4008	40,08x10 ⁶
Ti-8Ca-4P	0,15	50	0.5	568	5,68x10 ⁶
Ti-8Ca-4P	0,15	50	1	1520	15,2x10 ⁶
Ti-8Ca-4P	0,15	50	2	4680	46,8x10 ⁶
Ti-10Ca-4P	0,15	50	0.5	1356	13,56x10 ⁶
Ti-10Ca-4P	0,15	50	1	2496	24,96x10 ⁶
Ti-10Ca-4P	0,15	50	2	7776	77,76x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	0.5	936	9,36x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	1	1524	15,24x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	2	4440	44,4x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-3Ag	0,15	50	0.5	772	7,72x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-3Ag	0,15	50	1	1368	13,68x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-3Ag	0,15	50	2	3200	32x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-5Ag	0,15	50	0.5	740	7,4x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-5Ag	0,15	50	1	1440	14,4x10 ⁶
Ti-4Ca-4P-5Ag	0,15	50	2	4104	41,04x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P	0,15	50	0.5	458	4,58x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P	0,15	50	1	742	7,42x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P	0,15	50	2	2114	21,14x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	0.5	245	2,45x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	1	408	4,08x10 ⁶
Po-Ti-4Ca-4P-1Ag	0,15	50	2	1392	13,92x10 ⁶

Gümüş ilavesiz MAO kaplama sonrası numunelerin 0.5N, 1N, 2N yük altında aşınma izi boyunca meydana gelen aşınma kaybı değişimleri Şekil 7.14. 'de görülmektedir. Artan Ca oranı ile aşınma dayanımlarında artış görülmüştür. 0.5N yük altında Ti-4Ca-4P numunesine göre Ti-6Ca-4P nolu numunede %74,51, Ti-8Ca-4P nolu numunede %53,6 aşınma kaybında azalma meydana gelmişken, Ti-10Ca-4P nolu numunede %10,78 oranında artış göstermiştir. 1N yük içinde Ti-4Ca-4P numunesine göre Ti-6Ca-4P nolu numunede %38,12, Ti-8Ca-4P nolu numunede %28,64 aşınma kaybında

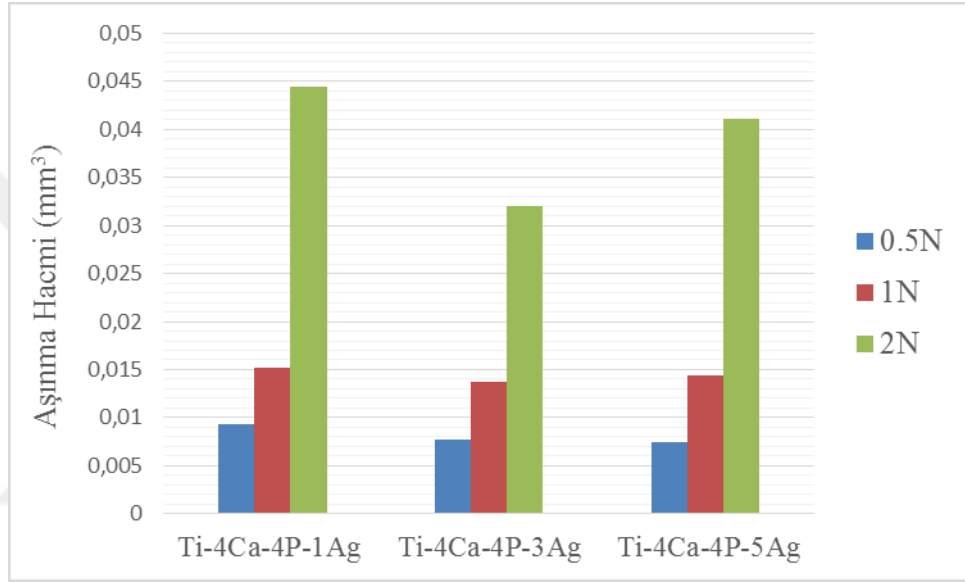
azalma meydana gelmişken, Ti-10Ca-4P nolu numunede %17,18 oranında artış göstermiştir. 2N yük altında Ti-4Ca-4P numunesine göre Ti-6Ca-4P nolu numunede %18,20, Ti-8Ca-4P nolu numunede %4,5 aşınma kaybında azalma meydana gelmişken, Ti-10Ca-4P nolu numunede %58,7 oranında artış göstermiştir. Artan yük ile aşınma oranlarında artış görülse de ilave edilen Ca ile aşınma dayanımı Ti-6Ca-4P ve Ti-8Ca-4P için iyileşme gösterirken %10 g/lit C₄H₈CaO₅ çözeltisi ilave edilince aşınma direnci azalma göstermektedir. Verilen yüzey SEM görüntülerinde de daha önce bahsedildiği üzere maksimum Ca yüzdesi ile kaplamada çatlamlar meydana gelmiş ve kaplama altlığı düzgün bir şekilde yapışma sağlayamamıştır. O sebeple aşınma Ti-10Ca-4P kodlu numunede oransal olarak daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 7.14. Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri

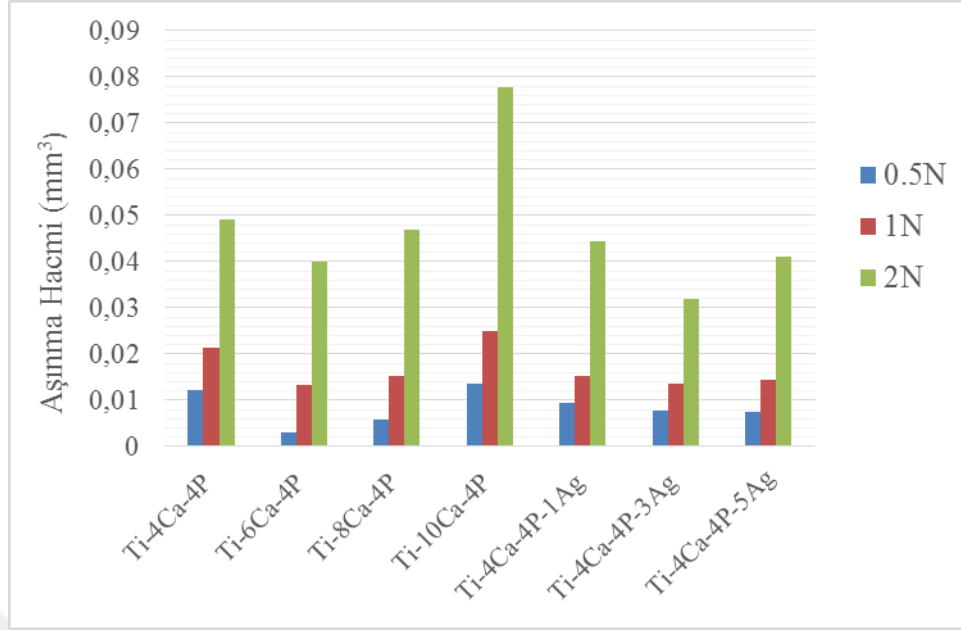
Gümüş ilaveli MAO kaplama sonrası numunelerin 0.5N, 1N, 2N yükleri altında meydana gelen hacimsel aşınma kaybı değişimleri Şekil 7.15.'de görülmektedir. Artan gümüş ilavesi ile aşınma dayanımında artış görülmüştür. 0.5N yük altında Ti-4Ca-4P-1Ag numunesine göre Ti-4Ca-4P-3Ag nolu numunede %17,52, Ti-4Ca-4P-5Ag nolu numunede %20,94 aşınma kaybında azalma meydana gelmiştir. 1N yük içinde Ti-4Ca-4P-1Ag numunesine göre Ti-4Ca-4P-3Ag nolu numunede %10,24, Ti-4Ca-4P-5Ag nolu numunede %5,12 aşınma kaybında azalma meydana gelmiştir. 2N yük içinde Ti-

4Ca-4P-1Ag numunesine göre Ti-4Ca-4P-3Ag nolu numunede %27,93, Ti-4Ca-4P-5Ag nolu numunede %7,6 aşınma kaybında azalma görülmüştür. Çözelti konsantrasyonunda ki artış ile çözelti iletkenliği artmış (gümüş iletkenliği yüksek olması sebebi ile) olacağından, artan iletkenlik büyüme hızını iyileştirmektedir. Mikropor çapları ergimiş oksit miktarının artışı ile daha yoğun ve daha pürüzsüz bir kaplama tabakası oluşturmuştur. O sebeple tüm numune grupları incelendiğinde gümüş ilave edilen kaplama numunelerinin aşınma dayanımı daha iyi çıkmıştır.



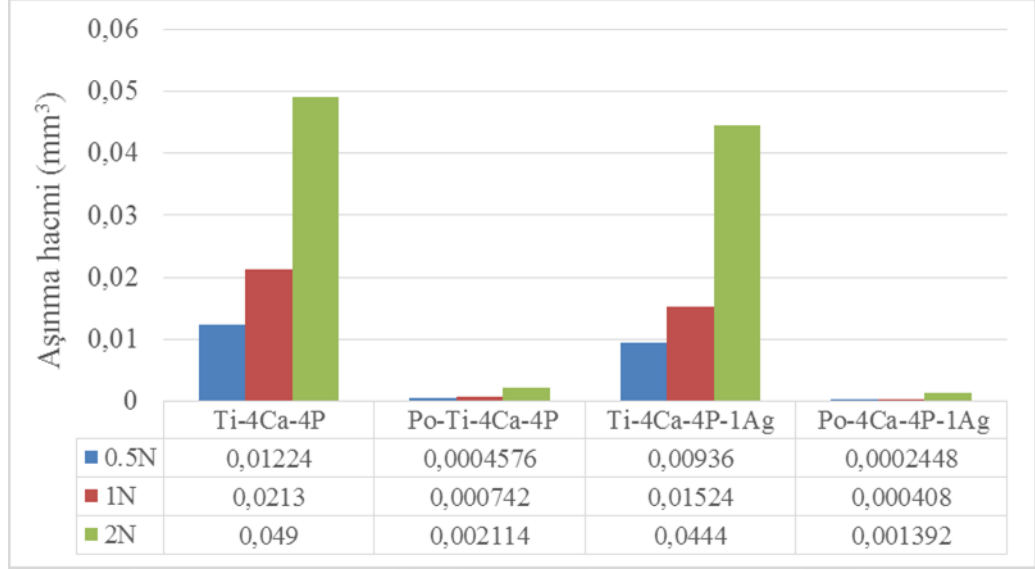
Şekil 7.15. Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag, Ti-4Ca-4P-5Ag numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yükaltında aşınma kaybı değişimleri.

Şekil 7.16.'da tüm numune gruplarının (Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P ve Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag ve Ti-4Ca-4P-5Ag) hacimsel aşınma kaybı sonuçları verilmiştir. Uygulanan yükler altında gümüş ilaveli numunelerin aşınma kaybının daha az olduğu görülmektedir. 0.5N da gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P numunesine göre Ti-4Ca-4P-1Ag numunesinde %23,53, Ti-4Ca-4P-3Ag numunesinde %36,93 ve Ti-4Ca-4P-5Ag numunesinde ise % 39,54 aşınma dayanımı artmıştır. 1N ve 2N yükleri içinde gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P numunesine göre Ti-4Ca-4P-1Ag numunesinde %28,45 ve %10,20, Ti-4Ca-4P-3Ag numunesinde %35,77 ve %34,7 ve Ti-4Ca-4P-5Ag numunesinde ise %32,4 ve %16,25 aşınma dayanımı artmıştır.



Şekil 7.16. Gümüş ilavesiz ve gümüş ilaveli tüm numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri.

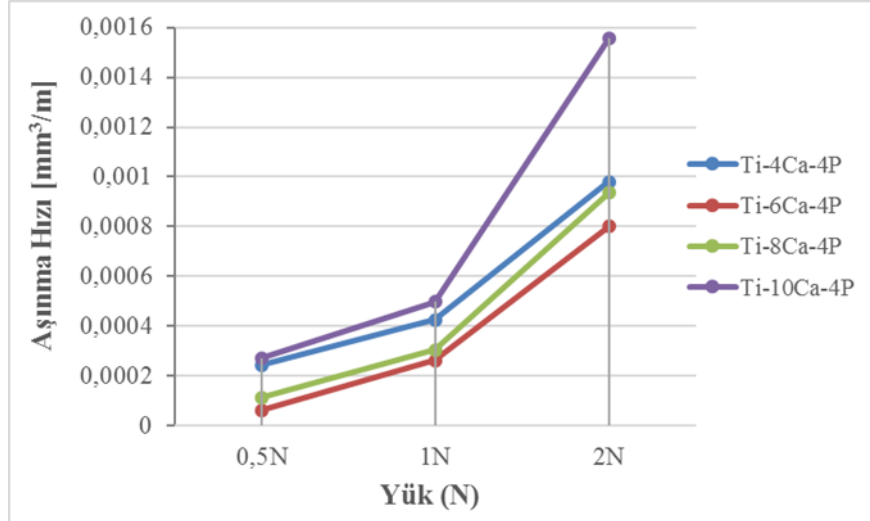
Gümüş ilavesi yüzey pürüzlülüğünü etkilediği gerekçesi ile aşınma testi yüzeyi parlatılmış iki numune üzerinden tekrar denenmiştir. Parlatma işlemi için bir adet gümüş ilave edilmeyen Ti-4Ca-4P ve minimum oranda gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numuneleri seçilmiştir. Şekil 7.17.'de parlatma işlemi sonrası aşınma hacimleri oranları parlatılmayanlar ile kıyaslandığında yüzey pürüzlülüğünün aşınmada etken olduğu görülmektedir.



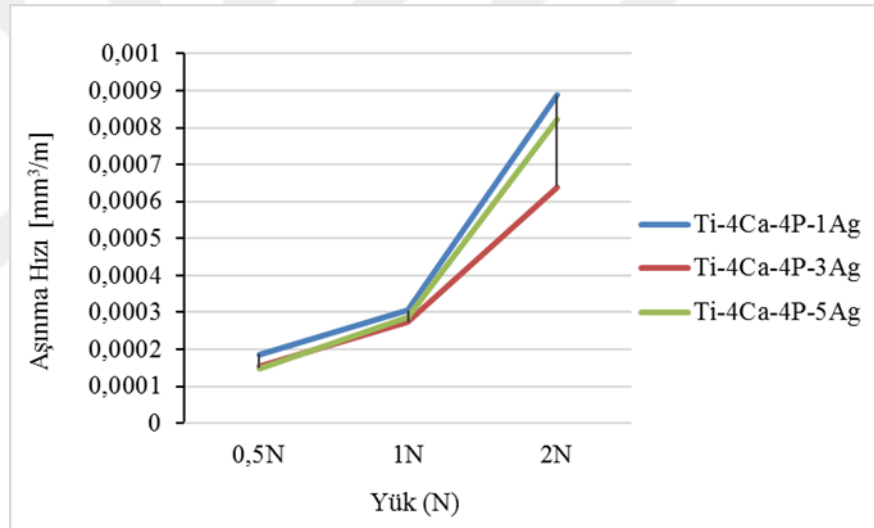
Şekil 7.17. Gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P ve gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numunelerinin parlatmaöncesi ve parlatma sonrası 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma kaybı değişimleri.

7.4.2. Aşınma hızı

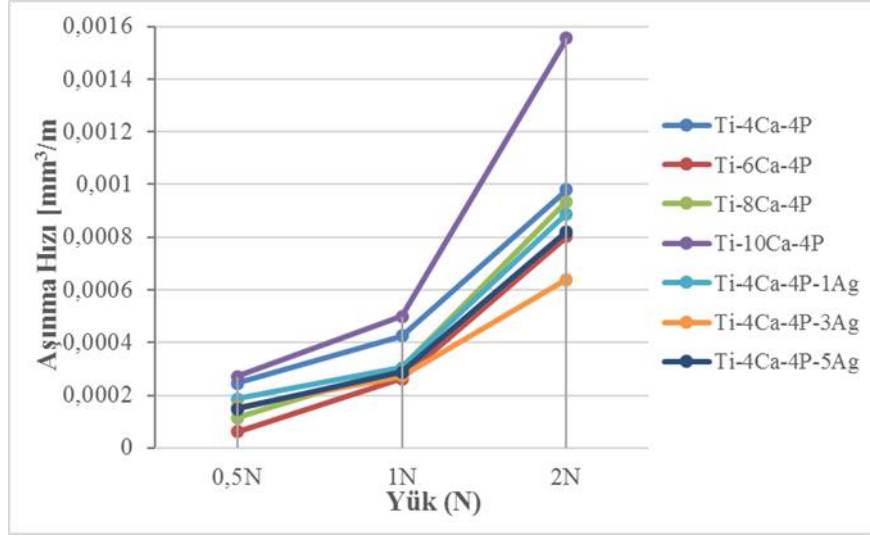
0.5N, 1N ve 2N yükleri altında kaplama spesifik aşınma hızı değişimleri incelendiğinde kaplama hızı artan Ca konsantrasyonu ile aşınma hızında azalma meydana gelmişken, maksimum Ca konsantrasyonu ile aşınma hızı artmıştır. Maksimum Ca yüzdesi ile kaplamada çatlamlar meydana gelmiş ve kaplama altlığı düzgün bir şekilde yapışma sağlayamamıştır. Şekil 7.18.'de gümüş ilavesiz kaplama numunelerinin, Şekil 7.19.'da gümüş ilaveli numunelerin aşınma hızı grafikleri verilmiştir. Tüm numune grupları kıyaslandığında gümüş ilaveli numunelerin daha iyi aşınma dayanımı gösterdiği görülmektedir (Şekil 7.20.). Bu durum hakkında detaylı bilgi Bölüm 7.4.1. 'de verilmiştir.



Şekil 7.18. Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P, Ti-10Ca-4P numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri

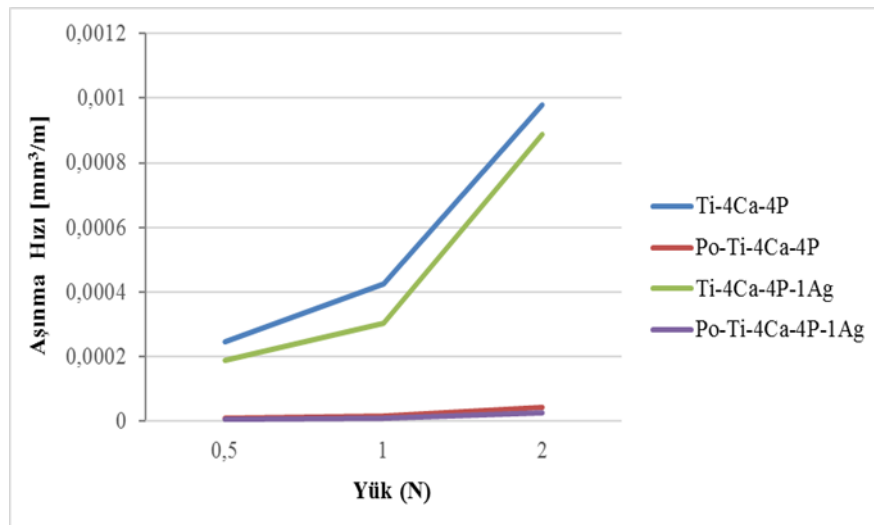


Şekil 7.19. Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag, Ti-4Ca-4P-5Ag numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri



Şekil 7.20. Gümüş ilavesiz ve gümüş ilaveli tüm numunelerinin 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızları değişimleri.

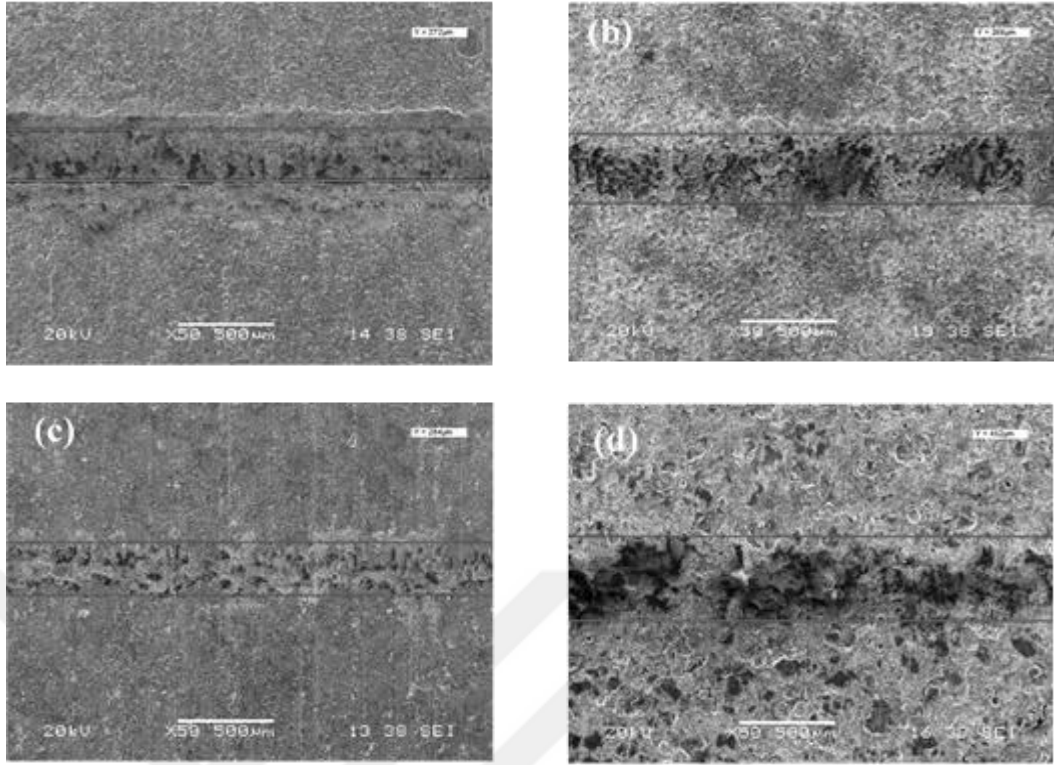
Kaplama sonrası yapılan aşınma testlerinde çok bariz farklılıklar tespit edilememesi sebebi ile ve yüzey pürüzlülükleri görüntülerden de görüldüğü üzere (Şekil 7.2., 7.3. ve 7.4.'de) test öncesi Ti-4Ca-4P ve minimum gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numunelerinin yüzeyleri parlatılmıştır. Parlatma sonrası yapılan aşınma testlerinde aşınma hızının Ti-4Ca-4P'e göre 0.5N için %23,53, 1N için %28,45 ve 2N için %9,39 azaldığı, Ti-4Ca-4P-1Ag'de ise 0.5N için %46,51, 1N için %45,02 ve 2N için %34,15 azaldığı görülmüştür. Meydana gelen değişimler Şekil 7.21.'de verilmiştir.



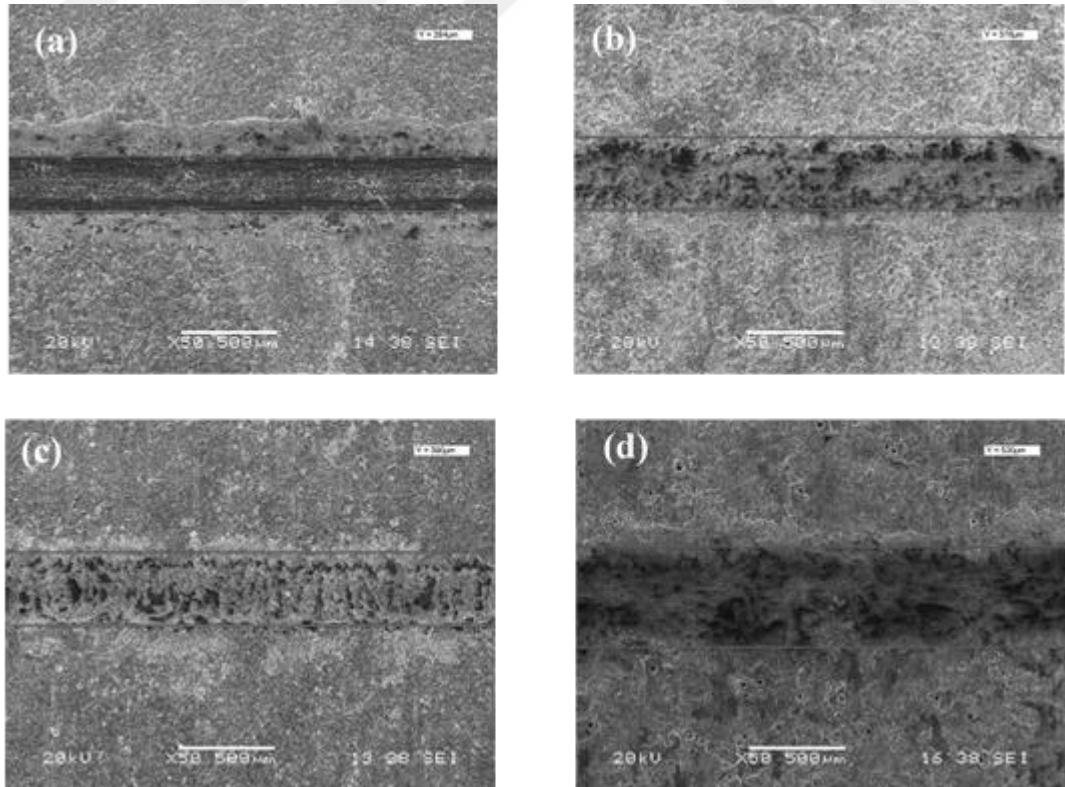
Şekil 7.21. Gümüş ilavesiz Ti-4Ca-4P ve gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag numunelerinin parlatma öncesi ve parlatma sonrası 0.5N, 1N ve 2N yük altında aşınma hızlarının değişimleri

7.4.3. Aşınma izi SEM görüntüleri

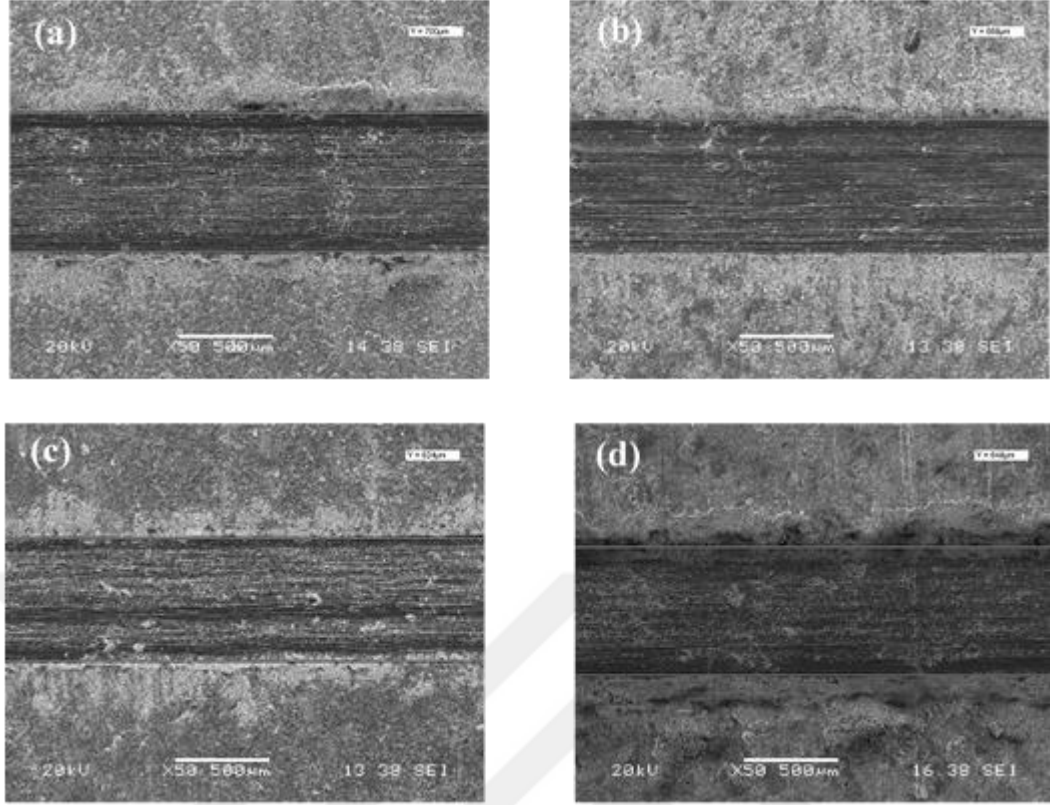
MAO ile kaplanan ve artan $C_4H_8CaO_5$ konsantrasyonu ile aşınma izinin genişliğinin %10 g/l $C_4H_8CaO_5$ ilave edilen numuneye kadar küçülme göstermiştir. Oksitlenmiş malzemelerin aşınma mekanizması doğrudan taban malzemeyle oksit tabaka arasındaki adezyona bağlıdır. Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P numunelerinde yapışma daha iyi olması sebebi ile iz genişlikleri birbirine yakın ve daha küçük değerlerde çıkmıştır (Şekil 7.22., Şekil 7.23., Şekil 7.24.). Ti-10Ca-4P kodlu numune de kaplama sonrası bile yüzeyde ufak dökülmeler meydana gelmiştir. Yani düşük adezyona sahip oksit tabakasının kalkması çok daha kolay olacaktır. Bu kopan parçalar hem yeniden bir pasif yüzey oluşmasına sebep olabilirler hem de karşı yüzeye sıvanabilirler. Bu tabaka da karşı yüzeye sıvanan bu parçaların etkisiyle sürekli olarak aşınmaya maruz kalır ve sonuçta bu sürekli aşınma hali hem taban malzemeyi ve hem de kaplamayı parçalar. Bu malzemenin ve tabakanın parçalanmasıyla metal kaybı artar ve yüzey gitgide daha pürüzlü bir hal alır. Şekil 7.22., Şekil 7.23. ve Şekil 7.24.'da sırası ile 0.5N, 1N, 2N için gümüş ilavesiz numunelerin aşınma izi genişlikleri verilmiştir. Bazı numunelerin aşınma izi daha geniş ölçülmesine rağmen daha az aşındığı hesaplamalar da gösterilmişti, bu durum aşınma alanını hesaplarken iz derinliğinin de önemli olduğunu vurgulamaktadır. Kaplamanın altlığı daha iyi yapışması daha yoğun bir kaplama olduğunu göstermekte olup aşınma izi derinliğini olumlu anlamda etkilemektedir.



Şekil 7.22. Gümüş ilavesiz numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P)

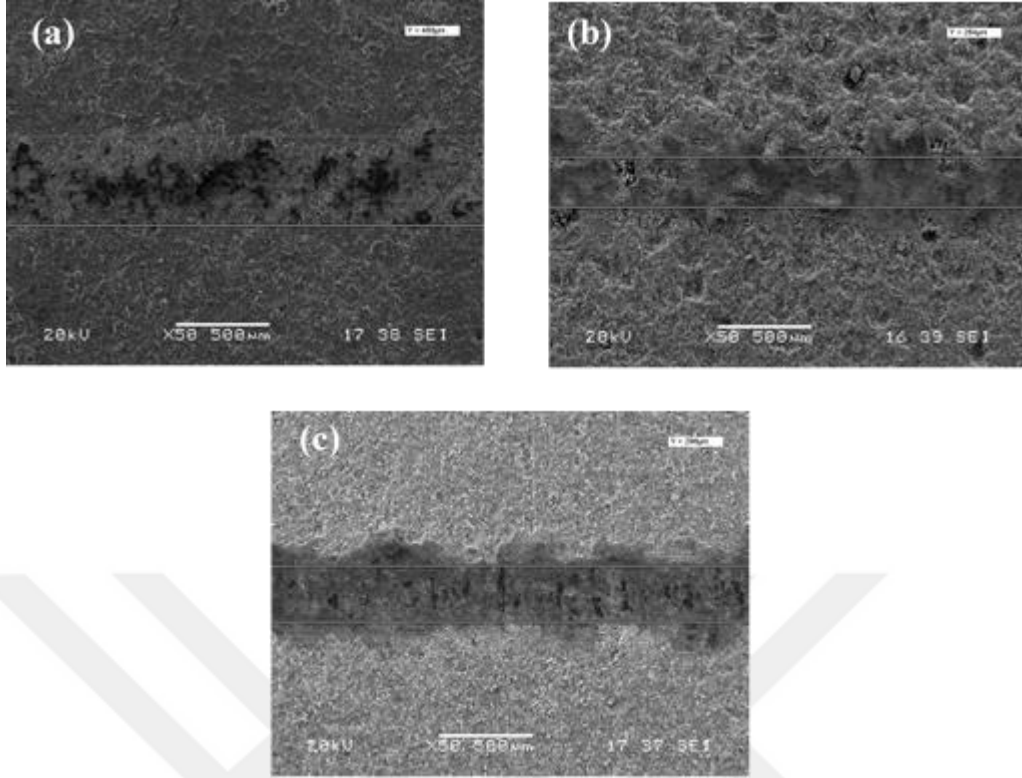


Şekil 7.23. Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P)

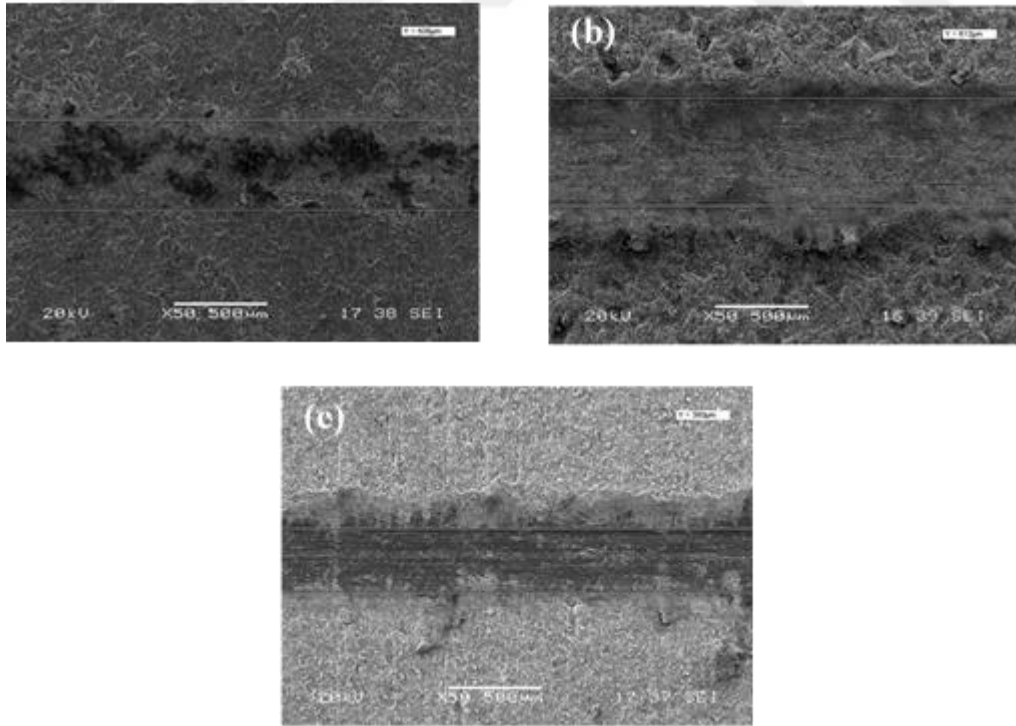


Şekil 7.24. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P)

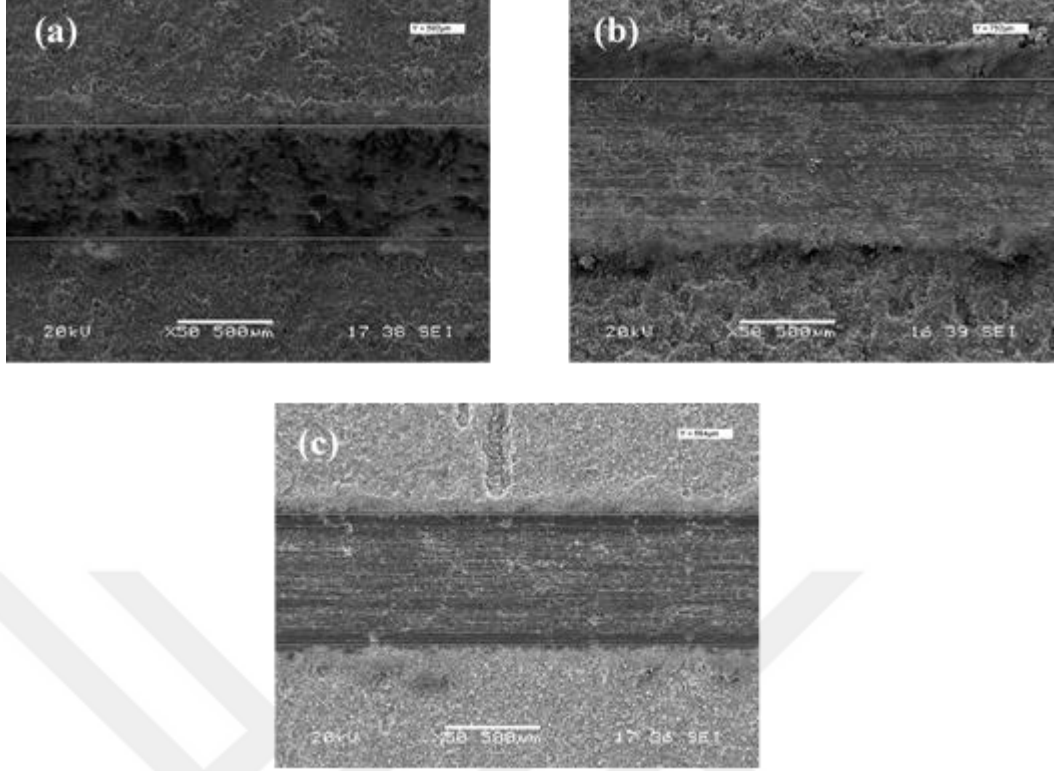
Şekil 7.25., Şekil 7.26. ve Şekil 7.27.'de sırası ile 0.5N, 1N, 2N yükleri için gümüş ilaveli (%1 g/l AgNO₃, %3 g/l AgNO₃, %5 g/l AgNO₃) numunelerin aşınma izi genişlikleri verilmiştir. Gümüş ilavesi ile oksitlenmiş malzemelerin aşınma mekanizması doğrudan taban malzemeyle oksit tabaka arasındaki adezyona, tabaka yoğunluğuna ve yüzey pürüzlülük durumuna bağlıdır. Gümüş ilaveli olan numuneler ilavesiz olanlara göre, daha yoğun bir tabaka oluşturduğu ve yüzey pürüzlülüğünün bir nebze azalması sebebi ile genişlikleri diğer grup numunelere göre daha geniş çıkmıştır. Ancak alınan profilometre ölçümleri sonucu iz derinlikleri daha az çıkmıştır. Buda daha yoğun bir tabaka oluşmuş olmasından mikroporların azalmış olmasından kaynaklanmaktadır. Alınan iz görüntülerinden de iz derinliğinin her üç numune grubu içinde çok derinleşmediği Şekil 7.25., 7.26. ve 7.27.'de net olarak görülmektedir.



Şekil 7.25. Gümüş ilaveli numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)



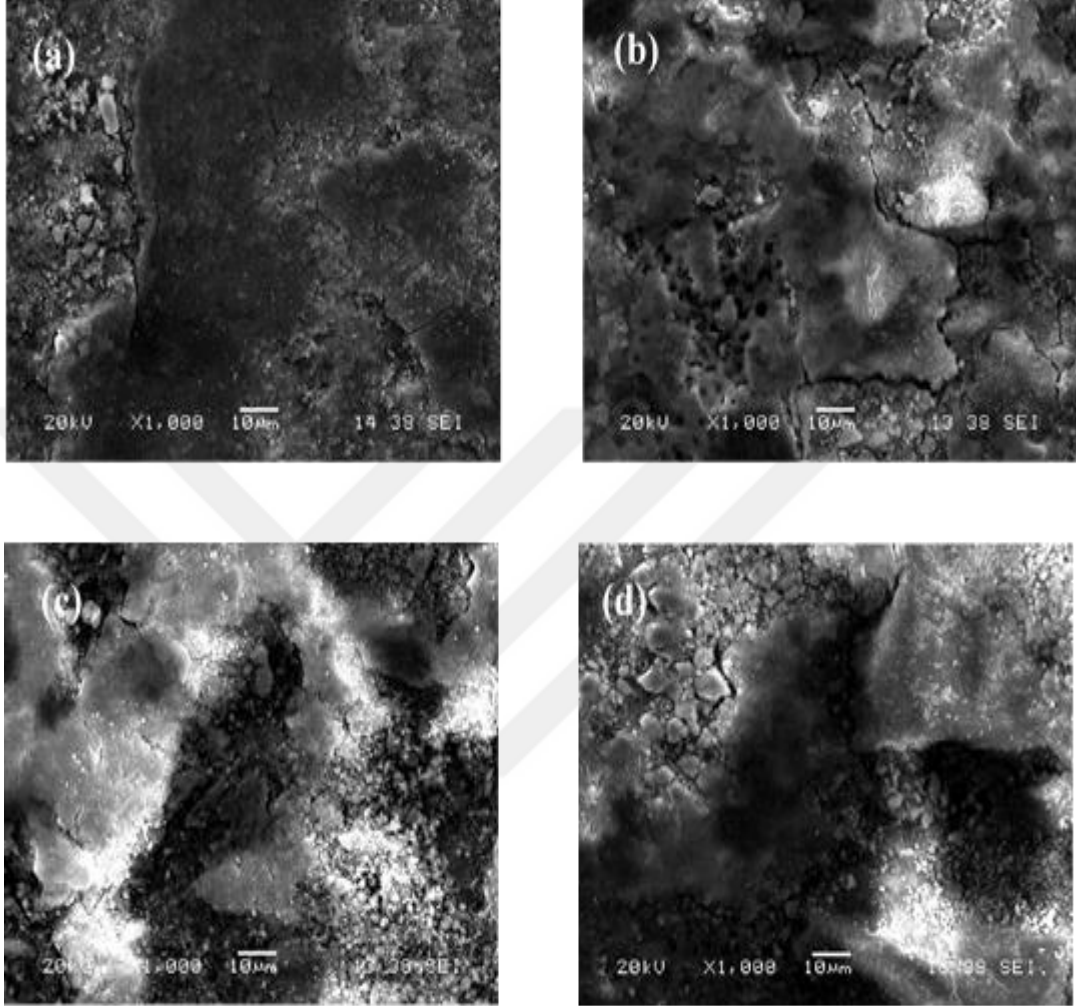
Şekil 7.26. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)



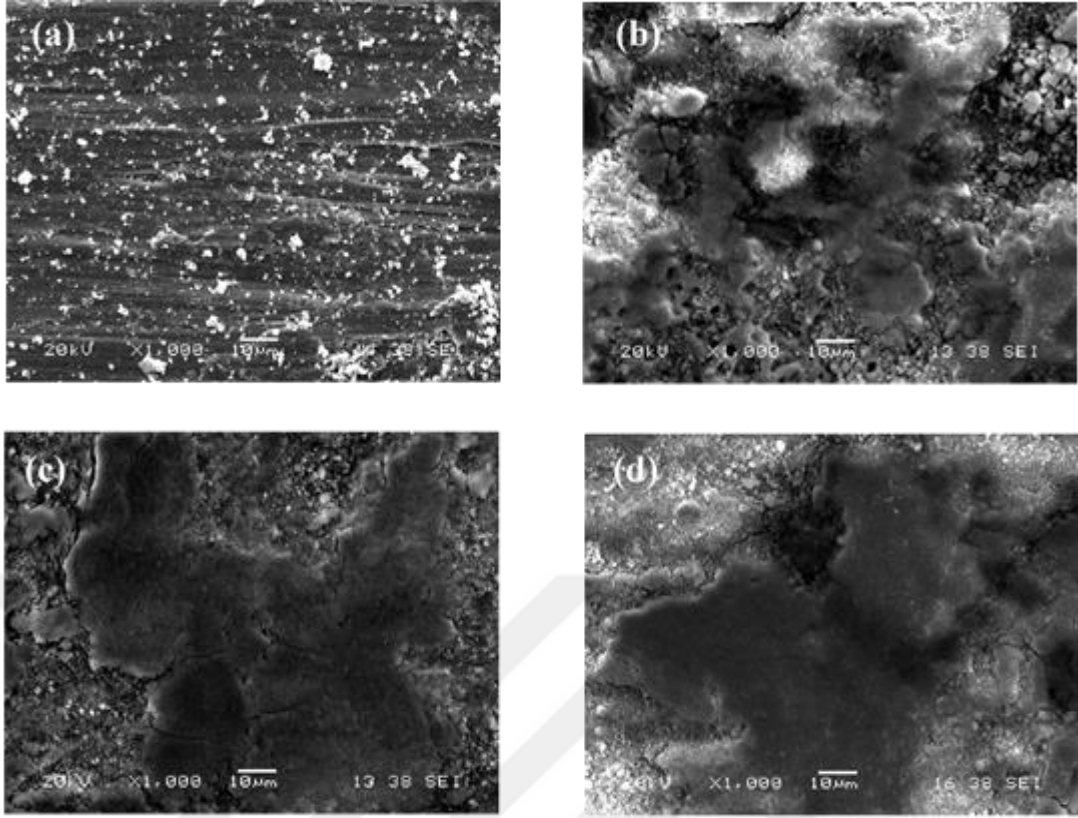
Şekil 7.27. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi genişliği SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)

Bilindiği gibi Ti ve Ti alaşımları oksijene karşı çok yüksek bir ilgileri olduğundan yüzeylerinde bir doğal oksit tabakası bulunur. Eğer bu tabaka kararlı bir tabakaysa aşınma dayanımı düşer. Eğer karalı değilse ve uygulanan normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri bu tabakayı kaldıracak kadar yüksekse abrasif etki meydana gelir ve aşınma dayanımı düşer [33-35]. Şekil 7.28., Şekil 7.29. ve Şekil 7.30.'de sırası ile 0,5N, 1N ve 2N yükleri altında Ti-4Ca-4P, Ti-6Ca-4P, Ti-8Ca-4P ve Ti-10Ca-4P kodlu numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir. Artan yüke bağlı olarak aşınmanın abrazyonunun arttığı görülmektedir. Düşük aşınma yükünde kaplamanın yüzeyindeki pürüzlü tabaka plastik deformasyona uğramış, pürüzlü yüzeyler aşınmıştır. Artan yüklerde aşınma izleri yol yol görülebilmektedir. Aşınma deneyi esnasında aşındırıcı bilye pürüzlü kaplama yüzeyini kaldırır ve kopan parçacıklardan dolayı abrasif tipte aşınma gözlenir. Buda aşınmanın şiddetlendiğini göstermektedir. Yüksek kalsiyum oranlı Ti-10Ca-4 P kodlu numunede aşınmanın en şiddetli olduğu görülmektedir. Hesaplanan hacim aşınma oranı sonuçlarında da bu durumu göstermektedir. Ayrıca bazı kaplamalarda aşınma sonucu bölgesel olarak mikro

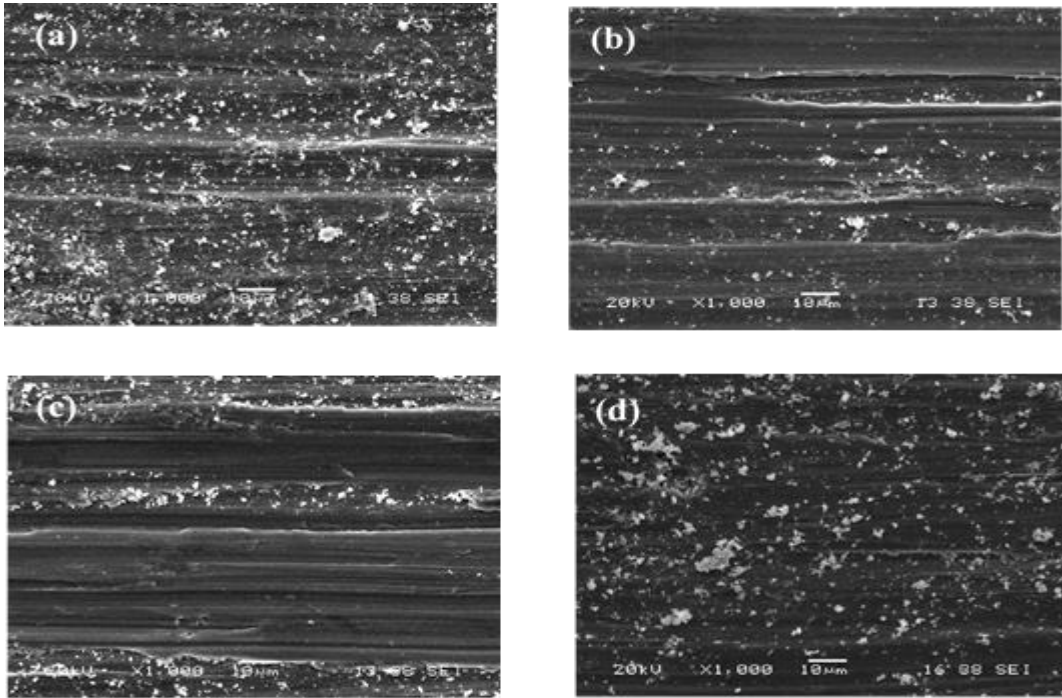
çatlakların birleşerek kaplamaların kazınarak yüzeyden atıldığı kaplama hasarları oluşmaktadır.



Şekil 7.28. Gümüş ilavesiz numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P

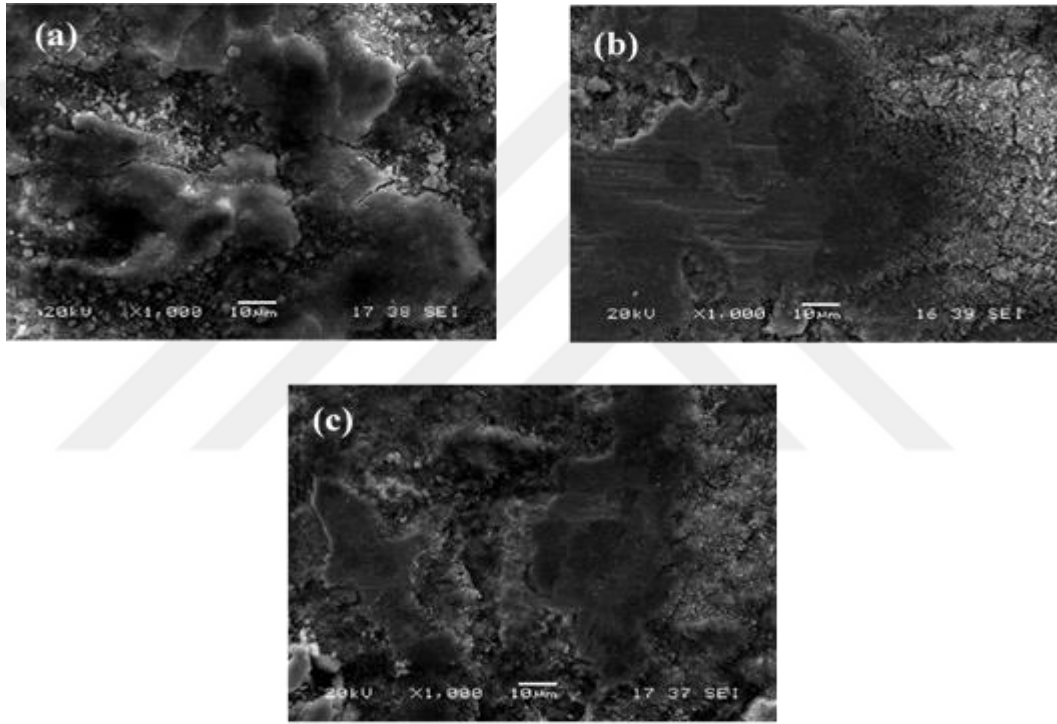


Şekil 7.29 Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P

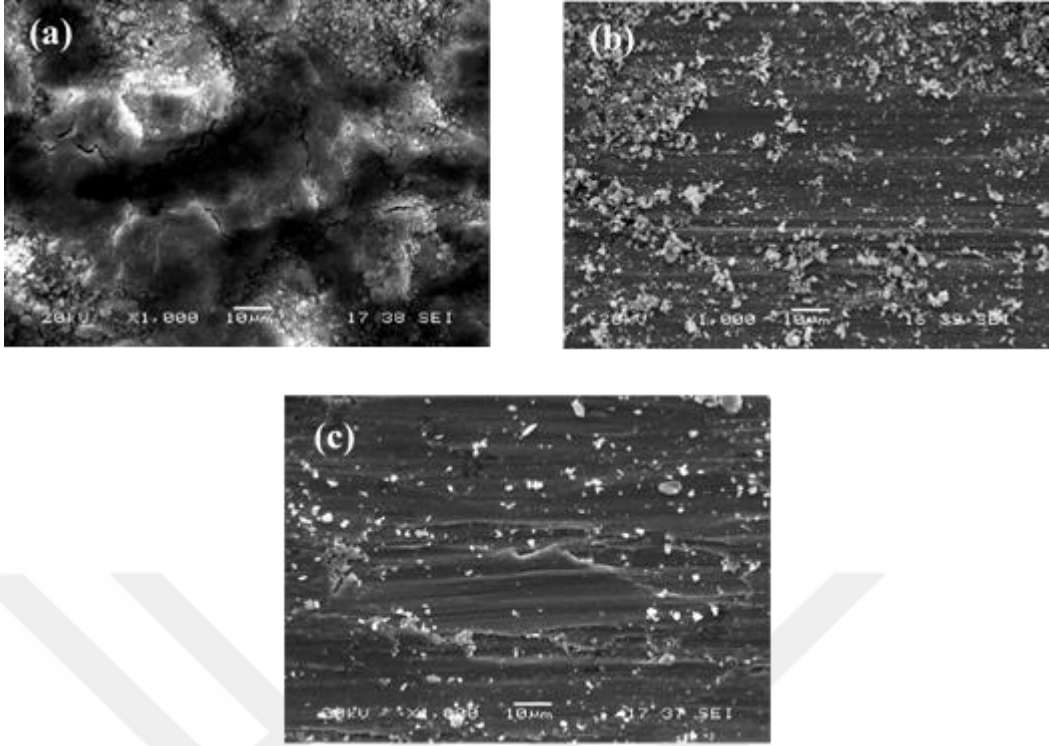


Şekil 7.30. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Ti-6Ca-4P (c) Ti-8Ca-4P (d) Ti-10Ca-4P

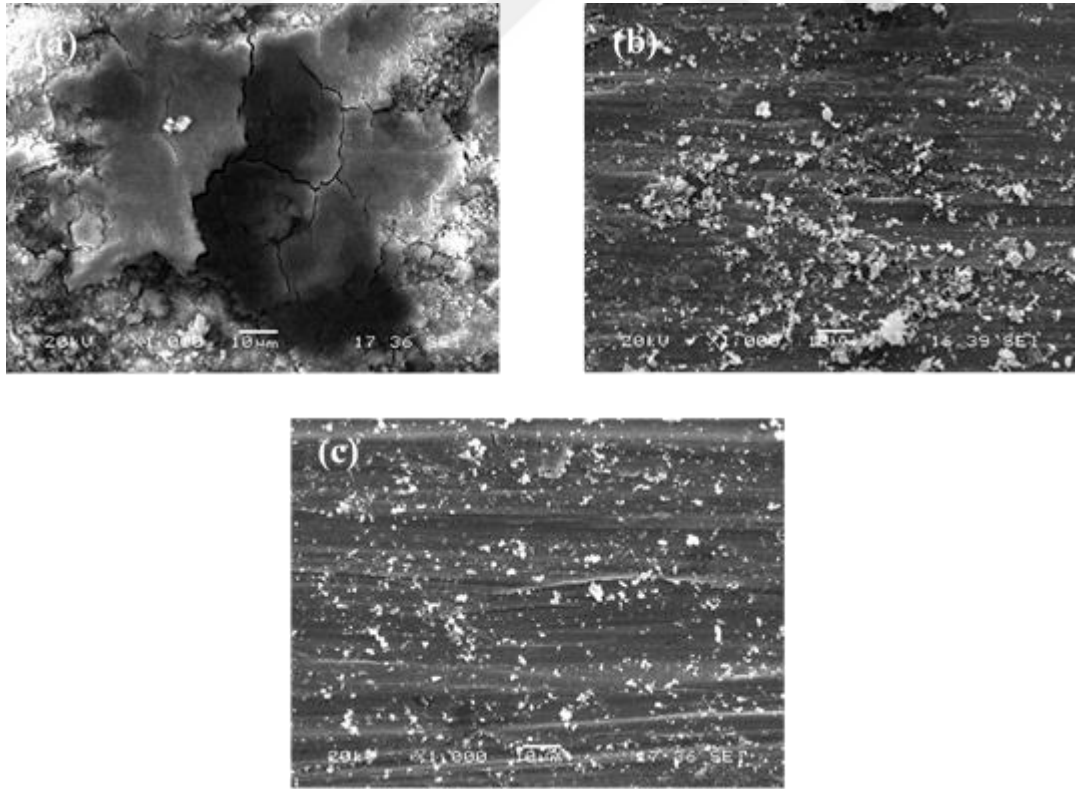
Şekil 7.31., Şekil 7.32. ve Şekil 7.33.'de sırası ile 0.5N, 1N ve 2N yükleri altında gümüş ilaveli (%1 g/l AgNO₃, %3 g/l AgNO₃, %5 g/l AgNO₃) Ti-4Ca-4P-1Ag, Ti-4Ca-4P-3Ag ve Ti-4Ca-4P-5Ag kodlu numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir. Artan yüke bağlı olarak aşınmanın abrazifliğinin arttığı görülmektedir. Fakat gümüş ilavesiz numunelere göre gümüş ilave edilenler de abrazif aşınma şiddetinin azaldığı görülmektedir. Düşük gümüş ilaveli numunede kaplamalarda aşınma sonucu bölgesel olarak mikro çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar birleşerek kaplamaların kazınarak yüzeyden atıldığı kaplama hasarları oluşmaktadır.



Şekil 7.31. Gümüş ilaveli numunelerinin minimum yük (0.5N) altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)

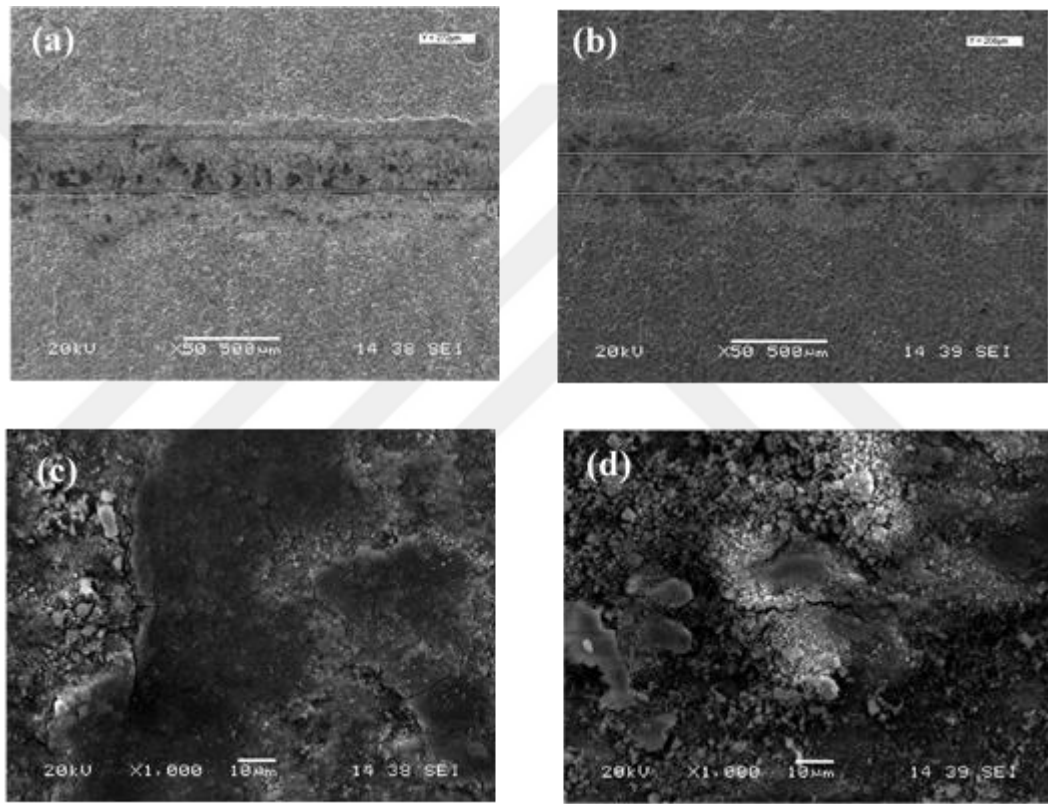


Şekil 7.32. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag;)

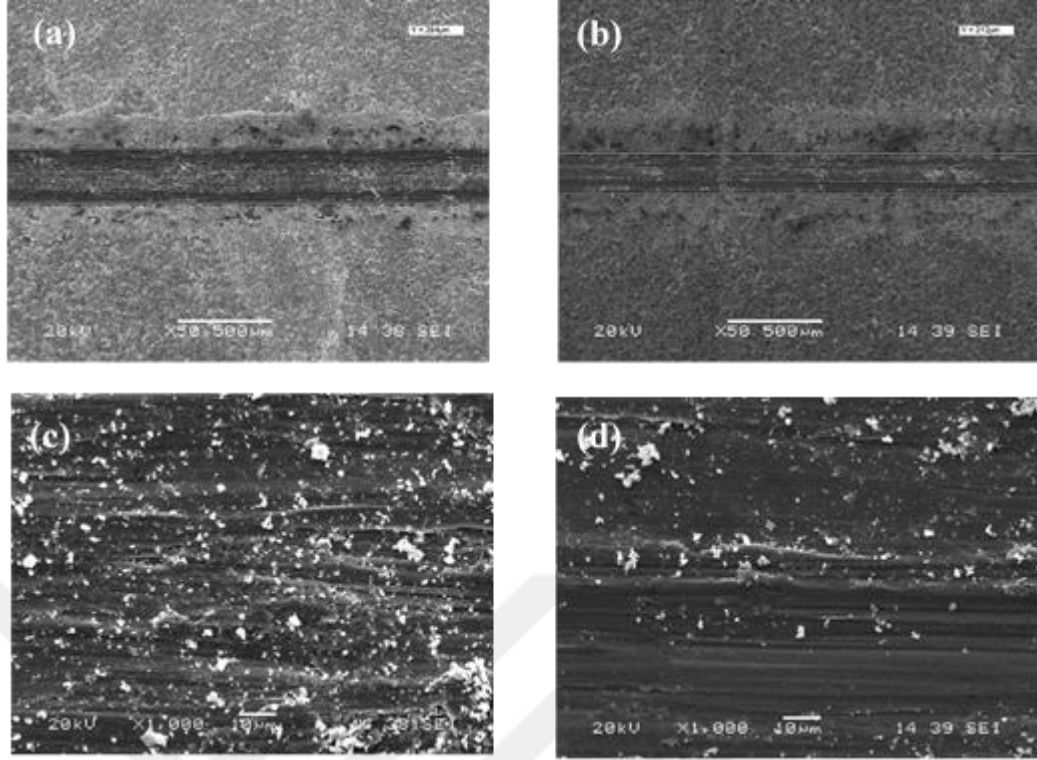


Şekil 7.33. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Ti-4Ca-4P-3Ag (c) Ti-4Ca-4P-5Ag)

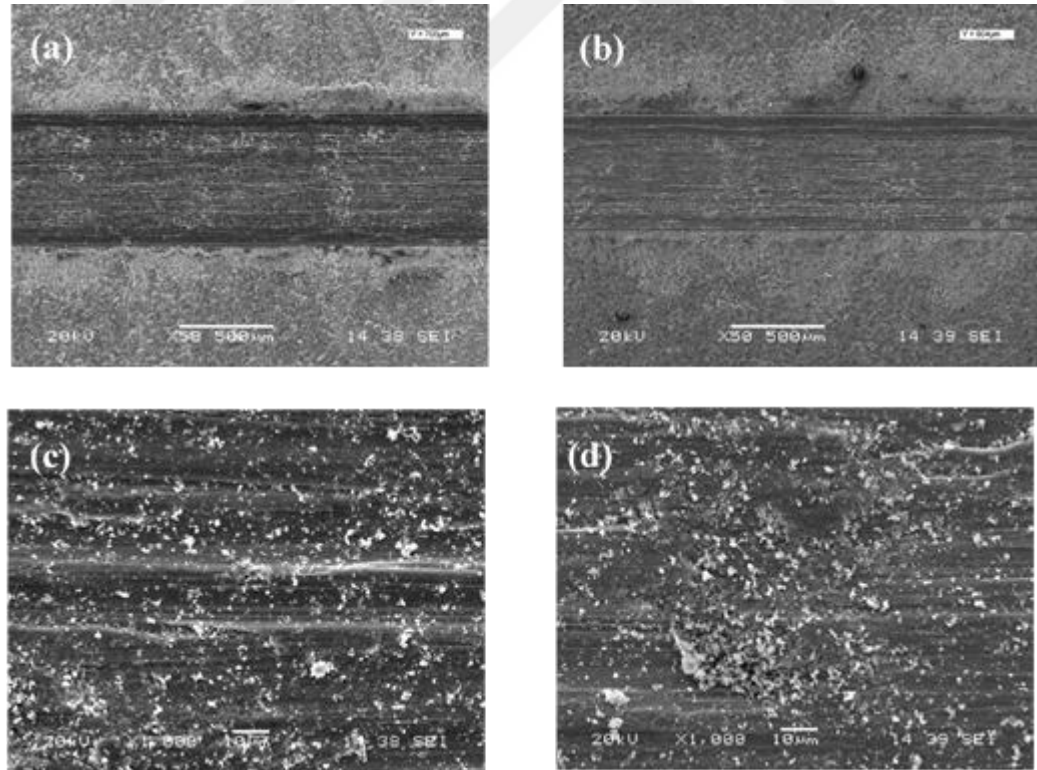
Yapılan aşınma deneylerinde yüzey pürüzlülüğü aşınma sonuçlarının olumsuz yönde etkilemesi sebebi ile gümüş ilave edilen ve edilmeyen bir grup numunenin yüzeyleri test öncesi parlatıldıktan sonra deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.34., Şekil 7.35. ve Şekil 7.36.' da parlatma öncesi Ti-4Ca-4P ve parlatma sonrası Po-Ti-4Ca-4P kodlu numunelerin 0.5N, 1N ve 2N yükleri altında ki aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir. Parlatma sonrası aşınma izi genişliklerinin azaldığı şekillerden görülmektedir. Yüzeyden kopan ve aşındırıcının görev yapan parçaların azalması sebebi ile hem aşınma şiddeti azalmış hem de oluşan yivlerin derinliği azalmıştır.



Şekil 7.34. Gümüş ilavesiz numunelerinin (0.5 N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütme ölçeklerinde yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P)

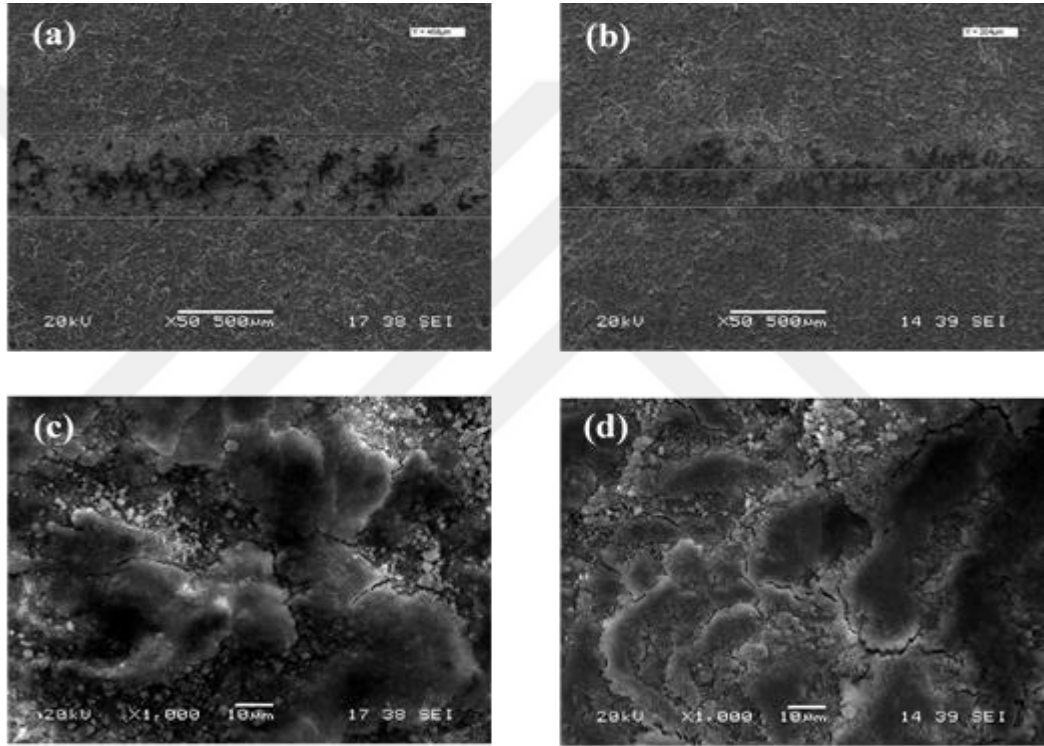


Şekil 7.35. Gümüş ilavesiz numunelerinin (1N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütme yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P

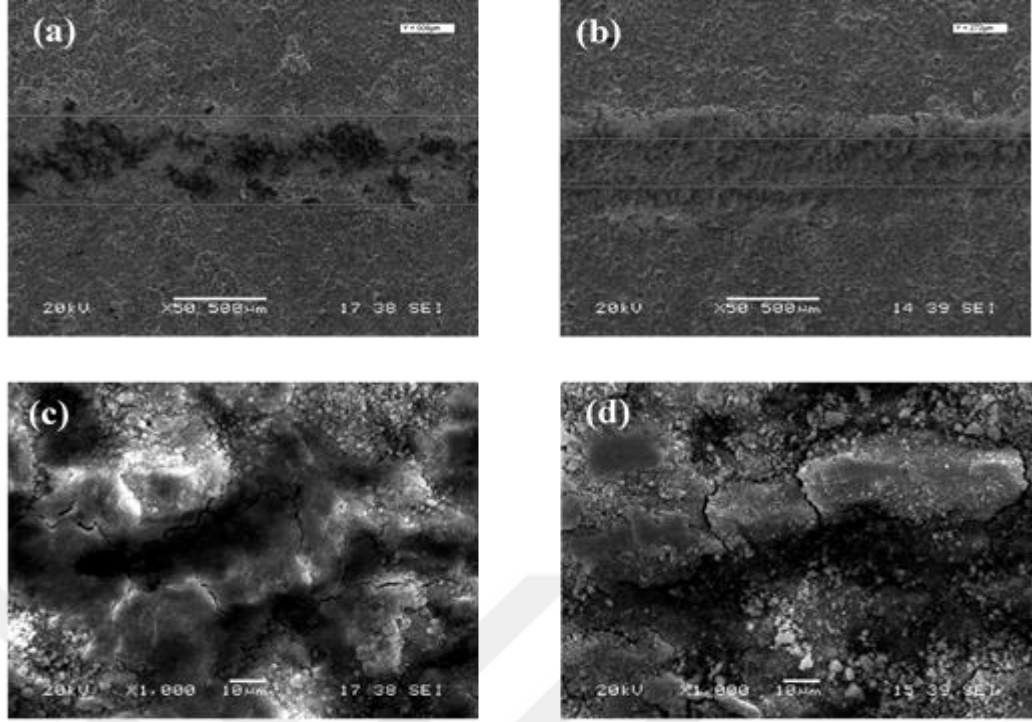


Şekil 7.36. Gümüş ilavesiz numunelerinin (2N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütme yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P (b) Po-Ti-4Ca-4P (c) Ti-4Ca-4P (d) Po-Ti-4Ca-4P

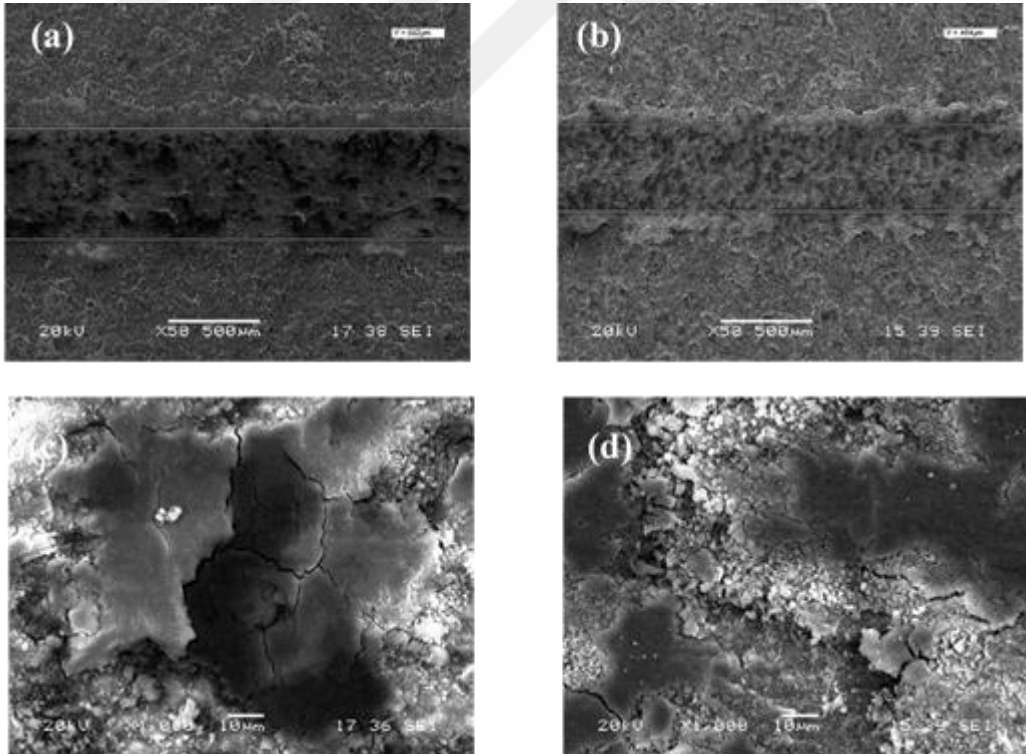
Şekil 7.37., Şekil 7.38. ve Şekil 7.39.’da parlatma öncesi gümüş ilaveli Ti-4Ca-4P-1Ag ve parlatma sonrası Po-Ti-4Ca-4P-1Ag kodlu numunelerin 0,5N, 1N ve 2N yükleri altında ki aşınma SEM görüntüleri verilmiştir. Gümüş ilaveli numunelerin daha yoğun tabaka oluşturması sebebi ile aşınmanın daha da azaldığını bir önceki kısımda bahsetmiştir. Parlatma sonrası ise aşınma izi genişliklerinin daha da azaldığı şekillerden görülmektedir. Yüzeyden kopan ve aşındırıcın görev yapan parçaların azalması sebebi ile hem aşınma şiddeti azalmış hem de oluşan yivlerin derinliği azalmıştır.



Şekil 7.37. Gümüş ilaveli numunelerinin (0,5N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütme ölçeklerinde yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag)



Şekil 7.38. Gümüş ilaveli numunelerinin (1N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelerde yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag



Şekil 7.39. Gümüş ilaveli numunelerinin (2N) yük altında kaplama düşük ve yüksek büyütmelerde yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) Ti-4Ca-4P-1Ag (b) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag (c) Ti-4Ca-4P-1Ag (d) Po-Ti-4Ca-4P-1Ag

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Titanyum alaşımına $C_4H_6CaO_4.H_2O$, Na_3PO_4 çözeltilerine farklı oranlarda (%1 g/l, %3 g/l, %5 g/l) gümüş nitrat ilavesinin, aynı süre ve voltajda uygulanarak yapılan MAO işlemi sonucunda elde edilen kaplamaların özellikleri ve işlem parametrelerindeki değişimin kaplama yapısına etkileri aşağıda özetlenmektedir;

1. Gümüş nitrat içermeyen ve içeren tüm kaplamalarda yüzey başarı ile kaplanmıştır. Elektrolit çözeltisinde ki değişim yüzey morfolojisini değiştirmiştir. Artan $C_4H_6CaO_4.H_2O$ ilavesi ile yüzeyde oluşan mikropor çapları azalmış olup, maksimum $C_4H_6CaO_4.H_2O$ ilavesi ile de kaplama yüzeyden dökülme göstermiştir.
2. Gümüş ilave edilen kaplamalarda kaplama daha yoğun bir şekilde yüzeyde oluşum göstermiştir. Gümüş ilavesi ile mikroporlar neredeyse tamamı kapanmıştır.
3. Gümüş ilave edilmeyen elektrolit çözeltisi içerisinde üretilen kaplamaların yapısında Ti, TiO_2 (rutile ve anatase) fazları oluşmaktadır. Artan $C_4H_6CaO_4.H_2O$ yüzdesi ile yüzeyde farklı olarak hidroksiapatit fazı elde edilmiştir.
4. Her iki elektrolit çözeltisi içerisinde (gümüş ilaveli ve ilavesiz) üretilen kaplamaların yüzey pürüzlülükleri; artan gümüş takviyesi ile azalma göstermiştir. En yüksek aşınma dayanımı %5 g/l gümüş nitrat ilave edilen numunelerde elde edilmiştir. Artan yüke bağlı olarak aşınma hızı her numunede artış göstermiştir
5. Artan $C_4H_6CaO_4.H_2O$ yüzdesi ile aşınma dayanımı % 8 g/l $C_4H_6CaO_4.H_2O$ 'ya kadar artış göstermiştir. Kaplamaların yapısında daha

fazla miktarda bulunan rutile fazının sağladığı yüksek sertlikten dolayı, aşınma direnci üretilen kaplamaların parametrelere göre farklılık göstermesine sebep olmuştur. En zayıf aşınma dayanımı %10 g/l $C_4H_6CaO_4.H_2O$ ilavesi yapılan kaplama numunesinde görülmüştür. Kaplama sonrası numune yüzeyinde elle dökülmeler meydana gelmiştir.

6. Gümüş ilave edilen kaplamaların aşınma dayanımı gümüş ilavesiz numunelere göre daha iyi sonuç vermiştir. Gümüş ilavesi ile azalan mikroporlar aşınma dayanımını iyileştirmiştir.
7. Kaplanan numune yüzeylerinin parlatılmasından sonra yapılan aşınma testlerinde parlatılan numunelerin hacimsel aşınma oranı ve aşınma hızı parlatılmamış olan numunelere göre daha düşük çıkmıştır.
8. MAO ile kaplanan numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma çizgilerinin gümüş ilaveli olan numunelere göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Yüzeyden kopan kaplama partikülleri yüzeyi daha derin aşındırmıştır.
9. Parlatma öncesi yapılan aşınma testlerinde yüzeyden kopan kaplama parçaları yüzeyi aşındırıcı etki gösterirken parlatma sonrası alınan SEM görüntülerinde yüzeyin daha az aşındığı, oluşan yivlerin genişliğinin ve derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

1. MAO teknolojisinde kullanılan parametreler (voltaj, süre etkisi) ve kullanılan elektrolit çözeltisi değiştirilerek kaplama işlemi üzerine etkisi incelenebilir.
2. Aşınma testleri kuru ortam yerine farklı cins sıvı yağ, yağ katkı maddeli yağ veya yapay vücut sıvısı ile çalışmalar devam ettirilebilir.
3. MAO ile kaplanan numunelerin korozyon testi ile dayanımları test edilebilir

KAYNAKLAR

- [1] Lütjering, G. (2007).Titanium, Springer 2nd edition, s:16.
- [2] Leyens, C. ve Peters, M. (2003). Titanium and Titanium Alloys, Wiley-VCH, Weinheim.
- [3] DeGarmo, E. P., Black, J. T. ve Kohser, R. A., (1984). ASM Metals Handbook, 9. Edition, Volume 3 Propertie and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Species-Purpuse Metals Titanium and Titanium Alloys, MacMillan Publishing Company, New York, s: 352.
- [4] Weiss, I. ve Semiatin, S. L. (1998). Thermomechanical processing of beta titanium alloys, Materials Science and Engineering A, 243, 46-65.
- [5] Barbosa, P. F. ve Button, S. T. (2000). Microstructure and mechanical behaviour of the isothermally forged Ti-6Al-7Nb alloy, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 214, L02799.
- [6] Gu, W., Lv, G. H., Chen, H., Chen, G., Feng, W. ve Yang, S. (2007). Characterisation of Ceramic Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum Alloy. Materials Science and Engineering, 447, 158-162.
- [7] Wang, Y., Lei, T., Jiang, B. ve Guo, L. (2004). Growth, Microstructure and Mechanical Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on Titanium Alloy in Phosphate Containing Solution. Applied Surface Science, 233, 258-267.
- [8] Guo, H.F., An, M.Z., Huo, H.B., Xu, S. ve Wu, L.J. (2006). Microstructure Characteristic of Ceramic Coatings Fabricated on Magnesium Alloys by Micro Arc Oxidation in Alkaline Silicate Solutions. Applied Surface Science, 252, 7911–7916.
- [9] Tohumcu, S. (2005). Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlarının Kaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- [10] Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering: A review, Surface and Coatings Technology, 122, 73-93.

- [11] Günyüz, M. (2007). Titanyum ve Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon İşlemi ile Kaplanması. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [12] Sun, X., Jiang, Z., Xin, S. ve Yao, Z. (2005). Composition and Mechanical Properties of Hard Ceramic Coating Containing α -Al₂O₃ Produced by Micro Arc Oxidation on Ti-6Al-4V Alloy. *Thin Solid Films*, 474, 194-199.
- [13] Mostofizadeh, A., Li, Y., Song, B. ve Huang¹, Y. (2011). Synthesis, Properties, and Applications of Low Dimensional Carbon Related Nanomaterials: A review, Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials, doi:10.1155/2011/685081.
- [14] Tekin, K.C., Çakmak, E. ve Malayoğlu, U. (2008). Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makine*. Cilt 49, sayı. 582, Sf. 3-9.
- [15] Fukuda, T. ve Kakuhari, T. (2007). New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite. *Journal-Surface Finishing Society of Japan*, 58, 357-360.
- [16] Morks, M. F., Cole, I., Corrigan, P. ve Kobayashi, A. (2011). Electrochemical Characterization of Plasma Sprayed Alumina Coatings. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, Vol. 1 No. 3, 107-111.
- [17] Malayoglu, U., Tekin, K. C., Malayoglu, U. ve Shrestha, S. (2011). An Investigation into the Mechanical and Tribological Properties of Plasma Electrolytic Oxidation and Hard Anodized Coatings on 6082 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering*, 528, 7451– 7460.
- [18] Lee, J.M., Kang, S.B. ve Han, J. (2008). Dry Sliding Wear of MAO Coated A356/20 vol. % SiCp Composites in the Temperature Range 25– 180°C. *Wear*, 264, 75-85.
- [19] Snizhko, L.O., Yerokhin, A.L., Pilkington, A., Gurevina, N.L., Misnyankin, D.O., Leyland, A. ve diğ. (2004). Anodic Processes in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions. *Electrochimica Acta*, 49, 2085-2095.
- [20] Özcömert M., İleri Malzeme Teknolojileri Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, Ekim 2005.
- [21] Sirek Faruk, Deneysel Aşınma Modeli Verileri İçin Uygun Parametre Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [22] Bharat Bhushan (2013). *Introduction to Tribology*, Wiley A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.

- [23] Gwidon W. Stachowiak ve Andrew W. Batchelor (2012). “Engineering Tribology”, Butterworth Heinemann
- [24] Giovanni Straffelini (2015). Friction and Wear Methodologies for Design and Control, Springer.
- [25] Küçükyıldırım, B. O ve Akdoğan, Eker, A. 2012. “Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları,” TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, 53(630):34-44.
- [26] E.M. Borteloto, A.Crovani, V. Seriacopi, F.J. Profito, D.C. Zachariadis ve I.F. Machado (2013). “Experimental and numerical analysis of dry contact in pin on disc test”, Wear, 301(2013):19-26.
- [27] Gaoqiang Xu, Xingkun Shen, Fabrication of SiO₂ nanoparticles incorporated coating onto titanium substrates by the micro arc oxidation to improve the wear resistance, Surface & Coatings Technology 364 (2019) 180–186.
- [28] Yuan-Hong Wang, Zhan-Guo Liu, Jia-Hu Ouyang, Ya-Ming Wang, Yu-Jin Wang, Dependence of the infrared emissivity on SiC content and microstructure of microarc oxidation ceramic coatings formed in Na₂SiO₃ electrolyte, Applied Surface Science 431 (2018) 17–23.
- [29] Wentao Yu, Ruixue Sun , Ziqiang Guo, Zhiyuan Wang, Yong He, Guangyi Lu, Panyu Chen, Kezheng Chen, Novel fluoridated hydroxyapatite/MAO composite coating on AZ31B magnesium alloy for biomedical application, Applied Surface Science 464 (2019) 708–715.
- [30] Mahshid Sabaghi Joni, Arash Fattah-alhosseini, Effect of KOH concentration on the electrochemical behavior of coatings formed by pulsed DC micro-arc oxidation (MAO) on AZ31B Mg alloy, Journal of Alloys and Compounds 661 (2016) 237-244.
- [31] Salih Durdua, Salim Levent Aktug, Sitki Aktas, Emine Yalcin, Kultigin Cavusoglu, Atilgan Altinkok, Metin Usta, Characterization and in vitro properties of anti-bacterial Ag-based bioceramic coatings formed on zirconium by micro arc oxidation and thermal evaporation, Surface and Coatings Technology, 331, (2017), 107–115.
- [32] Xiangyu Zhang, Ruiqiang Hang, Haibo Wu, Xiaobo Huang, Yong Ma, Naiming Lin, Xiaohong Yao, Linhai Tian, Bin Tang, Synthesis and antibacterial property of Ag-containing TiO₂ coatings by combining magnetron sputtering with micro-arc oxidation, Surface and Coatings Technology, 235, (2013), 748–754.

- [33] Wei Yang, Dapeng Xu, QiaoQin Guo, Tao Chen , Jian Chen, Influence of electrolyte composition on microstructure and properties of coatings formed on pure Ti substrate by micro arc oxidation, *Surface and Coatings Technology*, 349, (2018), 522–528.
- [34] M. Shokouhfar, S.R. Allahkaram, Effect of incorporation of nanoparticles with different composition on wear and corrosion behavior of ceramic coatings developed on pure titanium by micro arc oxidation, *Surface and Coatings Technology*, 309, (2017), 767–778.
- [35] Qingbiao Li, Wenbin Yang, Cancan Liu, Daoai Wang, Jun Liang, Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes, *Surface and Coatings Technology*, 316, (2017), 162–170.



ÖZGEÇMİŞ

Çağatay DEMİRBAŞ, 04.11.1991 yılında Bolu doğumludur. İlk ve orta öğrenimini Bolu Sakarya İ.Ö.O'nda tamamlamıştır. 2006 - 2010 yılları arasında Bolu Atatürk Lisesinde (şu an Bolu Anadolu Lisesi) Matematik - Fen bölümünde öğrenimini tamamlayıp 2010 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğine giriş yapmıştır. Lisans eğitimini 4 sene sonunda 2014 yılında tamamlayıp, 2015 yılı Ocak ayında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinin de yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Halen özel sektörde mühendislik görevine devam etmektedir. Evlidir.