

**MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Arş.Gör.Mehmet Erbil ÖZCAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Latif ÖZLER
OCAK-2014**

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

**MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arş.Gör.Mehmet Erbil ÖZCAN

(11201007)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Program: Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Latif ÖZLER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:

OCAK-2014

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

**MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arş.Gör.Mehmet Erbil ÖZCAN

(11201007)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30/12/2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 22/01/2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Latif ÖZLER

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr.Mehmet EROĞLU

Yrd.Doç.Dr.Gül TOSUN

OCAK-2014

ÖNSÖZ

Özverili bir çalışma sonucunda ortaya çıkan bu tezin hazırlanmasında; değerli bilgisini, tecrübelerini, zamanını esirgemeyen ve çokça desteğini gördüğüm, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd.Doç.Dr. Latif ÖZLER'e ve Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı başkanı sayın Doç.Dr.Nihat TOSUN'a ve Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi sayın Yrd.Doç.Dr.Soner BUYTOZ'a teşekkür ederim.

Erzurum Atatürk Üniversitesi'nde yaptığım çalışmalar esnasında her türlü yardım ve desteğini sunan sayın Prof.Dr.Yaşar TOTİK ve sayın Arş.Gör.E.Emine DEMİRCİ'ye de ayrıca teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanması sırasında, sabrı, özverisini ve anlayışını hiç azaltmayan kıymetli eşime teşekkürlerimi sunarım.

Maddi desteklerinden dolayı, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MF-13.04) Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Mehmet Erbil ÖZCAN

ELAĞİĞ – 2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SEMBOLLER LİSTESİ.....	x
1 GİRİŞ.....	11
1.1 Literatür Taraması.....	12
2 GENEL BİLGİLER	17
2.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları.....	17
2.1.1 Alüminyum 7075 Alaşımına Ait Özellikler.....	20
2.1.2 Alüminyum 7075 Alaşımına Ait Özellikler.....	22
2.2 Metallerin Kaplanması	23
2.3 Yüzey Kaplama Malzemeleri	24
2.4 Kaplama Türleri.....	25
2.4.1 Sert Yüzey Kaplama	25
2.4.2 Dolgu Kaplama	25
2.4.3 Koruyucu Kaplama	26
2.4.4 Kademeli Kaplama	26
2.5 Yüzey Kaplama Yöntemleri	27
2.5.1 Buhar (Gaz) Fazı Yöntemiyle Kaplama	27
2.5.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi	28
2.5.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi	28
2.5.1.3 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PACVD) Yöntemi.....	28
2.5.2 Sıvı Faz Esaslı Yöntemlerle Kaplama	29
2.5.2.1 Sol Jel Yöntemi	29
2.5.2.2 Kimyasal Yolla Kaplama	30
2.5.2.3 Elektrokimyasal Yolla Kaplama	30
2.5.2.3.1 Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplama.....	30
2.5.3 Ergitme Esaslı Kaplamalar	31
2.5.3.1 Lazerle Yüzey Kaplama Yöntemi.....	32
2.5.3.2 Tozaltı Kaynağı İle Kaplama Yöntemi	32
2.5.3.3 Gaz Tungsten Ark İle (GTA veya TIG) Kaplama Yöntemi.....	33
2.5.4 Yarı Ergimiş Fazdan Üretilen Kaplama.....	34
2.5.4.1 Isıl Püskürtme (Termal Sprey) Yöntemi	34
2.5.4.2 Alev Püskürtme Yöntemi	35
2.5.4.3 Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi.....	36
2.5.4.4 Patlamalı Püskürtme (D-Gun) Yöntemi.....	37
2.5.4.5 Plazma Püskürtme Yöntemi	38
2.5.4.6 Elektrik Ark İle Püskürtme Yöntemi	38

2.6 Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi.....	40
2.6.1 MAO Yönteminin Kullanım Alanları.....	42
2.6.2 MAO Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	42
2.6.3 MAO Kaplama Ünitesi	43
2.7 Sürtünme ve Mekanizmaları	44
2.7.1 Kuru Sürtünme.....	45
2.7.2 Sınır (Yarı Sıvı) Sürtünme	45
2.7.3 Film (Sıvı) Sürtünme	46
2.8 Sürtünme Teorileri ve Sürtünme Katsayısı	46
2.9 Aşınma.....	48
2.9.1 Aşınma Türleri.....	49
2.9.1.1 Adhesif Aşınma.....	49
2.9.1.2 Alışma Aşınması	50
2.9.1.3 Yenme Tipi Aşınma	50
2.9.1.4 Abrasif Aşınma	51
2.9.1.5 Eroziyon Aşınma	52
2.9.1.6 Pulcuk Kalkması (Pitting).....	52
2.9.1.7 Korozif Aşınma.....	53
2.9.1.8 Yorulma Aşınması	53
2.10 Aşınma Deney Yöntemleri.....	54
2.11 Aşınma Ölçüm Metotları.....	56
2.11.1 Ağırlık Farkı Metodu.....	56
2.11.2 Kalınlık Farkı Metodu	56
2.11.3 İz Değişim Metodu	57
2.11.4 Radyoizotop Ölçüm Metodu	57
2.11.5 Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu.....	57
3 MATERYAL VE METOT	58
3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması	58
3.2 Deneylerin Yapılışı	59
3.3 Numunelerin Kaplanması.....	61
3.4 Kaplanan Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçümü.....	65
3.5 Kaplanan Numunelerin Aşınma Deneylerinin Yapılışı ve Ölçümü	65
4 BULGULAR VE TARTIŞMA	67
4.1 Kaplanan Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin İncelenmesi	67
4.2 Aşınma Davranışının İncelenmesi.....	72
5 GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
6 KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	88

ÖZET

Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama, bir elektrolit içerisinde daldırılan altlık malzemenin elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeyin sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanması işlemidir.

Bu çalışmada alüminyum(Al7075) altlık malzeme üzerine mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemiyle iki aşamalı kaplama işlemi yapılmıştır. Birinci aşamada potasyum hidroksit(KOH), sodyum alüminat(NaAlO_2) ve sodyum fosfat(Na_3PO_4) solüsyonu karışımı ile alüminyum oksit(Al_2O_3) kaplanmıştır. İkinci aşamada ise aynı solüsyon içerisinde 0,8 gr/lt miktarında Ti tozu ilaveli edilerek kaplama işlemi yapılmıştır. Her iki kaplama türü için 100-350 Hz frekans, 450-500-550V voltaj ve 10-20-30 dak. işlem süreleri(kaplama süresi) değerleri kullanılmıştır. Kaplama işlemler sonucunda önce deney parametrelerinin(voltaj, frekans ve işlem süresi) ve Ti ilavesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacıyla ölçümler yapılmıştır. Daha sonra kaplanan numuneler blok halka(block-on-disk) deney cihazında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Bu incelemeler sonucunda voltaj, frekans ve işlem süresinin artmasıyla beraber yüzey pürüzlülüğünün arttığı, bu artışın en fazla voltaj değerinde meydana geldiği görülmüştür. Ti ilavesinin kaplamanın kalınlığını Ti ilavesiz kaplamaya göre daha fazla artırdığı, aynı şekilde yüzey pürüzlülüğünü de artırdığı belirlenmiştir. Kaplama parametrelerinin aşınmaya etkisi incelendiğinde ise; voltaj, frekans ve işlem süresinin artmasıyla aşınma miktarının azaldığı, Ti ilaveli kaplamalarda aşınmanın daha az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikro Ark Oksidasyon, Kaplama, Aşınma, Yüzey Pürüzlülüğü, Al7075

SUMMARY

Investigation of Wear Behaviour of Aluminum Alloy Coated With Micro Arc Oxidation Method

Micro arc oxidation method is the process of coating with hard, abrasion and corrosion resistant surface by immersing the substrate in an electrolytic liquid by effect of electrochemical reaction through the plazma discharge.

In this study, two-step coating is applied on aluminum(Al7075) by micro arc oxidation method. In the first step, the samples are coated aluminum oxide in the solution of potassium hidroxide, sodium aluminate and sodium phosphate. In the second step, coating is performed by adding 0,8 gr/lit Ti particules in the same solution. For both solutions, the frequence, voltage and processing time varied as 100-350 Hz, 450-550V, 10-30 min, respectively. After the coating process, measurements are carried out for analyzing the impact of experimental parameters(voltage,frequence and processing time) and Ti addition. Afterwards wear tests are applied on coated samples on block-on-disc abrassion test unit. As a result of this review, it has been seen that, surface roughness increases with increasing voltage, frequence and processing time and the maximum increasing occures in voltage parameters. Coating thicknesses are affected by the addition of Ti particules. Ti added coatings are thicker and rougher than non additive samples. When considering the effects of coating wear parameters, the amount of wear decreases with the increasing of voltage, frequence and processing time and the wear is found to be less in the Ti-added coatings.

Keywords: Micro Arc Oxidation, Coating, Wear, Surface Roughness, Al7075

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. Boksitten alüminanın elde edilişi	17
Şekil 2. Alüminadan alüminyumun elde edilişi.....	18
Şekil 3. Lazer kaplamanın şematik gösterilişi	32
Şekil 4. Gaz tungsten ark kaynağının şematik olarak gösterilişi.....	34
Şekil 5. Termal sprey yöntemiyle kaplamanın şematik gösterimi	35
Şekil 6. Alev püskürtme yönteminin torna tezgâhında uygulanması.	36
Şekil 7. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal sprey kaplama.....	37
Şekil 8. Plazma püskürtme işleminin şematik görünümü	38
Şekil 9. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü.	40
Şekil 10. Tribolojik sistemlerin kinematikleri.....	45
Şekil 11. Sürtünme olayı ve sürtünme kuvveti.....	47
Şekil 12. Statik ve kinematik sürtünme katsayısının farklılığı.....	48
Şekil 13. Aşınma olayını meydana getiren unsurlar.....	49
Şekil 14. Görünen ve gerçek temas alanları	50
Şekil 15. Aşınma aşınmasının olduğu tribolojik sistemler	50
Şekil 16. Abrasif aşınma mekanizması	51
Şekil 17. İki elemanlı abrasyon	51
Şekil 18. Üç elemanlı abrasyon	51
Şekil 19. Aşındırıcı çarpma hızının erozyona etkisi.....	52
Şekil 20. Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi.....	54
Şekil 21. Sürtünme ve aşınma model deney sistemleri (Pim-Disk ve Blok-Halka).....	55
Şekil 22. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Silindir-Silindir ve Çapraz Silindir).....	55
Şekil 23. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Levha-Kayış ve Pim-Levha)	55
Şekil 24. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Dört Bilya ve Siebel Kehl).....	55
Şekil 25. Kaplanmaya hazır numune.....	58
Şekil 26. Parlatma cihazı	59
Şekil 27. Deney programı	60
Şekil 28. Mikro Ark Oksidasyon Cihazı	62
Şekil 29. Deneyde kullanılan manyetik solüsyon karıştırıcısı.....	63
Şekil 30. Mekanik karıştırıcılı kaplama haznesi.....	63
Şekil 31. Numune kaplama esnasındaki görüntüsü (Ti ilavesiz kaplama).....	64
Şekil 32. Kaplama esnasında numune ve haznenin görüntüsü (Ti ilaveli kaplama)	64
Şekil 33. Aşınma Tezgâhı.....	65
Şekil 34. Numune tutucusu ve aşındırıcı elmas mil	66
Şekil 35. Kaplama voltajının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon)	68
Şekil 36. Kaplama voltajının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon)	68
Şekil 37. Farklı voltaj ve 100 Hz değerlerinde 10 dakika kaplanan numunelerin.....	69
Şekil 38. Kaplama frekansının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon).....	70
Şekil 39. Farklı frekans ve 550 V değerlerinde 20 dakika kaplanan numunelerin.....	71
Şekil 40. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 41. Ti ilavesinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi (a.Ti ilavesiz b.Ti ilaveli	72
Şekil 42. Kaplama süresi ve aşınma yolunun aşınma mik. etkisi (f=100Hz, V=450V).....	73
Şekil 43. Farklı kaplama süreleri, 550 V ve 100Hz değerinde kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (a.10 dak, b.20 dak,c.30 dak.).....	74
Şekil 44. Voltaj değerinin aşınma miktarına olan etkisi.....	75

Şekil 45. Farklı voltaj ve 350 Hz değerlerinde 20 dakika kaplanan numunelerin.....	76
Şekil 46. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-1.....	77
Şekil 47. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-2.....	77
Şekil 48. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-3.....	78
Şekil 49. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-4.....	78
Şekil 50. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-5.....	79
Şekil 51. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-6.....	79
Şekil 52. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-7.....	80
Şekil 53. Titanyum ilaveli Al_2O_3 kaplamanın EDX analiz sonucu(350 Hz 550V ve 20 dak. kaplama süresi)	80

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1. Alüminyuma ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler.....	18
Tablo 2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	20
Tablo 3. Alüminyum alaşımlarının ısıtıl işlem seri numaraları	21
Tablo 4. Al7075 alaşımının mekanik özellikleri	22
Tablo 5. Al7075 alaşımının kimyasal kompozisyon aralıkları.....	22
Tablo 6. Yüzey Kaplama Yöntemleri.....	27
Tablo 7. Deney Parametreleri (Ti ilavesiz)	60
Tablo 8. Deney Parametreleri (Ti ilaveli).....	61
Tablo 9. Solüsyonda kullanılan kimyasallar ve miktarları.....	62
Tablo 10. Kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	67
Tablo 11. Aşınma Deney Sonuçları.....	72

KISALTMALAR

MAO	:Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi
PEO	:Plazma Elektrolitik Oksidasyon
XRD	:X-Ray Diffraction
PVD	:Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	:Kimyasal Buhar Biriktirme
PACVD	:Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
HVOF	:Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Püskürtme Tekniği
XRD	:X-ışınları difraktometresi
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	:Enerji Yayılımı Cihazı
EIS	:Elektrokimyasal İmpedans Spektroskobu
HA	:Hidroksiapatit
GAXRD	:Glancing Angle X-ray Diffraction
D-Gun	:Patlamalı Püskürtme
GTA	:Gaz Tungsten Ark
HSP	:Hegzagonal Sıkı Paket
HMK	:Hacim Merkezli Kübik
XPS	:X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi

SEMBOLLER LİSTESİ

KOH	:Potasyumhidroksit
NaAlO₂	:Sodyumalüminat
Na₃PO₄	:Sodyumfosfat
NaSiO₂	:Sodyumsilikat
NaCl	:Sodyumklorür
m-ZrO₂	:Monoklinik zirkonyumoksit
t-ZrO₂	:Tetragonal zirkonyumoksit

1 GİRİŞ

Günümüzde araştırmacıların en önemli hedeflerinden biri metal ve metal alaşımlarının korozyon, aşınma ve yorulma dayanımı gibi özelliklerini iyileştirerek korozyon ve aşınmanın neden olduğu kayıpları azaltmaktır. Dünyada korozyon ve aşınma nedeniyle ortaya çıkan kayıplar milli gelirin %3,5-5'ini meydana getirmektedir[66]. Bugün bu kayıpları ortadan kaldırmak ve malzemelerin korozyon ve aşınma direncini gibi özellikleri iyileştirmek amacıyla yapılan işlemlerin önemli bir kısmı yüzey kaplama çalışmalarından oluşmaktadır. Kayıpları azaltmak amacıyla yapılan çalışmalar her geçen gün daha da geliştirilerek malzemelerden istenen özelliklerin bir arada olmasını sağlamaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi veya çevresel etkilere karşı korunabilmesi için yüzeylerin bir tabaka ile kaplanması birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik kaplamalar malzemelerin, korozyona, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı direncini artırmak için uygulanmaktadır. Metallere göre sertliği daha yüksek olan bu ince seramik kaplamalar sayesinde istenen özellikler sağlanabilirken, tokluk ve kolay şekillendirilebilme gibi diğer özellikler de korunabilmektedir. Böylece seramik kaplamalar, metal ve seramik malzemelerin üstün özelliklerinin bir arada toplanmasına ve kullanılmasına imkân tanımaktadır. Yüzey kayıplarını azaltmak ve yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan kaplama işlemleri son yıllarda vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir. Günümüzde bu amaçla yapılan birçok kaplama yöntemi kullanılmakla beraber mikro ark oksidasyon(MAO) yöntemi, özellikle 2000'li yıllardan sonra daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. MAO yöntemiyle kaplamanın en önemli sebebi, yatırım maliyetinin diğer kaplama yöntemlerine göre daha düşük olmasıdır. Mikro ark oksidasyon(MAO), diğer adıyla Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) teknolojisi, 2000'li yılların başlangıcından bu yana Keronite Ltd. firması önderliğinde birçok endüstriyel alanda, çeşitli hafif alaşımlar üzerine uygulanmaktadır[1]. Bu yöntem, Al, Mg, Ti, Zr, Nb ve bunların alaşımları ve inter-metalik malzemelere uygulanması mümkün olan yeni sayılabilecek bir kaplama teknolojisidir. MAO yöntemi, hafif alaşımların yüzeylerinde oksit tabakasının biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yeni teknoloji elektrolitik sıvı içerisine daldırılan altlık malzeme üzerinde oksit oluşturma ve buna bağlı olarak altlık malzemenin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılmaktadır.

MAO kaplama altlık malzeme ile olan güçlü adhezyonundan dolayı oldukça yüksek sertlik değerine, aşınma direncine, korozyon direncine sahip olması en önemli özelliğidir. Özellikle

yüksek sertlik ve aşınma direncinden dolayı plazma sprej ve EB-PVD (elektron demeti fiziksel buhar biriktirme) kaplamalar ile yarışmaktadır. Korozyondan koruma ve adhezyon özelliği açısından ise anot kaplamalar ile yarışmaktadır. Plazma elektrolitik oksidasyon yönteminde kaplama özelliğinin ayrıca altlık malzemeye de bağı olduğu bilinmektedir.

MAO yöntemi ile kaplama, alüminyum alaşımlı aşınma dirençli mutfak malzemeleri, hafif magnezyum esaslı moda aksesuarları (gözlük çerçevesi) ve elektronik malzemelerle sınırlı kalmasına rağmen son yıllarda tekstil, otomotiv, petrokimya, havacılık ve uzay sanayi gibi endüstrilerde, yüksek sıcaklık ve aşınmaya karşı makine parçalarının korunmasında kullanılmaktadır. Bunun haricinde biyomedikal malzemelerde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Biyomedikal malzemeler, insan vücuduna uyumu, korozyon etkisinin bulunmaması ve uzun yıllar kullanıma elverişli olması açısından ele alındığında, plazma elektrolitik kaplamanın kullanımı günümüzde artmıştır.

1.1 Literatür Taraması

Malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi veya çevresel etkilere karşı korunabilmesi için yüzeylerin bir tabakayla kaplanması amacıyla yapılan birçok yöntem kullanılmakla beraber, mikro ark oksidasyon yöntemi(MAO) son yıllarda daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan literatür taramasında anodik oksidasyon, anodik kıvılcımlı biriktirme, mikro ark anodik oksidasyon, mikro plazma anodik oksidasyon, mikro plazma oksidasyon, plazma elektrolitik oksidasyon ve elektroliz plazma oksidasyon olarak da bilinen mikro ark oksidasyon yöntemi ile ilgili bir çok çalışmaya rastlanmış olup bir kısım literatür çalışması aşağıda özetlenmiştir.

Hong-Xia Li ve arkadaşları çalışmalarında Al6063 alüminyum altlık malzeme üzerine sodyum silikat ve potasyum hidroksit elektrolitik sıvısına farklı konsantrasyonlarda nano Ti ilave edilerek TiO₂ kaplama yapmışlardır. Çalışmada nano Ti ilavesinin, kaplamanın yapısal ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Kaplama sonucunda, uygun konsantrasyon Ti ilave edildiğinde kaplamanın yapısında bazı nano Ti parçacıklar görüldüğü ifade edilmiştir. Solüsyon içindeki nano Ti ilavesi arttığında yapışma değeri artmış ve Ti miktarı 3,2 gr/L'ye çıkarıldığında en yüksek değere ulaştığı bildirilmiştir. Ayrıca nano parçacık oranının sürtünme katsayısına etkisi incelenmiş ve nano toz ilavesinin sürtünme katsayısını azalttığı ve bu azalmanın 3,2 gr/L Ti ilavesinde en düşük seviyede olduğu belirtilmiştir[2].

Sabatini ve arkadaşları, sık kullanılan iki alüminyum alaşımı olan AA359 döküm alaşımı ve AA7075 dövme alaşımını PEO yöntemiyle kaplayarak, aynı şartlarda kaplanan her iki malzemenin aşınma dirençleri ile mikro sertliklerini birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Her iki alaşım üzerinde oluşan tabakaların faz kompozisyonundaki değişikliğin, altlık malzemenin farklı kompozisyon ve mikro yapıda olmasından dolayı olduğu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak AA359 alaşımı üzerinde oluşan ara tabaka yüksek pürüzlülük sebebiyle küçük yük altında stabil durumdayken büyük yük altında stabil olmadığı ve kaplama altında kalan AA7075 alaşımı hem kaplamanın yüksek sertliği hem de yük taşıma kapasitesi sebebiyle AA359 ile karşılaştırıldığında öne çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı yük altında yapılan sertlik ölçümlerinde de yine AA7075'in daha üstün çıktığı görülmüştür[3].

Wasekar ve arkadaşları, çalışmalarında, mikro ark oksidasyon yöntemiyle Al-6061 alaşımını iki farklı akım yoğunluğunda kaplayarak korozyon davranışını incelemişlerdir. Kaplanan malzemedeki korozyon direnci değişimini görmek için %3.5'lik NaCl içinde potansiyodinamik polarizasyon testleri yapılmıştır. Sonuç olarak 600 saat %3.5'lik NaCl içinde polarizasyon testi yapılan kaplamanın korozyon direncinin, kaplanmamış malzemeye göre, 1 saatin sonunda 4,5 kat, 600 saatin sonunda ise 48 kat daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır[4].

Wen ve arkadaşları Al2024 altlık malzeme üzerine mikro ark oksidasyon yöntemi ile alkalın solüsyonu içerisinde 7 μ m kalınlığında alüminyum seramik kaplama yapmışlardır. Kaplamaların korozyon davranışı potansiyodinamik polarizasyon ve EIS cihazlarıyla incelenmiş ve korozyon işleminin üç aşamada gerçekleştiğini ifade edilmiştir. Bu aşamalar; ilk 2 ile 6 saatte yapılan birincil daldırma işleminde korozyon ortamının alüminyum alaşıma girişinin kaplama ile engellendiği görülmüştür. 24 saatin sonrasındaki ikincil aşamada korozyon ortamı kaplama ve altlık malzeme arasına girmeye başladığı ve çatlak ve kırıklarda dolayı çukurcuk korozyonunun olduğu bildirilmiştir. 96 saatin sonundaki üçüncü kısım ise son aşamadır. Bu bölümde korozyon işlemi, korozyona karşı dirençli ürünlerin difüzyonu ile tekrar kontrol edilir. Bu gözlemlerin sonucunda korozyon sürecinin üç aşamadan meydana geldiği ve kaplamanın yoğun ve üniform olduğu, kaplamanın içinde 5 μ m'nin altında gözenekler bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 168 saatlik NaCl çözeltisinde yapılan korozyon testinde malzeme üzerinde çatlak ve kırıklar oluştuğu ifade edilmiştir [5].

Özkara ve arkadaşları çalışmasında, mikro ark oksidasyon yöntemi ile Al2024 alaşımını sabit voltaj değerinde ve farklı kaplama sürelerinde işlemi kaplamışlardır. Kaplam işlemi sonrasında voltaj uygulama süresinin, yüzeyin çeşitli morfolojik özelliklerine ve aşınma

direncine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yüzeyde alfa- ve gama- Al_2O_3 fazlarını içeren bir oksit tabakası olduğu, bu tabakanın mikro ark oksidasyon işlemi için uygun morfolojide olduğu, tabakanın kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma direncinin ise voltaj uygulama süresine bağlı olarak geniş bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir[6].

Gençer ve arkadaşları çalışmalarında, saf zirkonyum altlık malzemesi üzerine mikro ark oksidasyon yöntemi ile sabit frekans, voltaj ve elektrolit kompozisyonunda 5, 15, 30, 45, 60, 90 ve 120 dakika süreyle kaplama yapmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu, profilometre ve mikrosertlik ölçümü ile Zr üzerinde oluşturulan kaplamanın faz kompozisyonu, mikroyapısı, yüzey morfolojisi ve mikrosertliği karakterize edilmiştir. Yapılan bu ölçümler sonucunda kaplama tabakasının gözenekli yapıda olduğu ve önemli miktarda mikro çatlak içerdiği gözlemlenmiştir. Kaplamanın kristal yapıdaki monoklinik (m- ZrO_2) ve tetragonal (t- ZrO_2) zirkonyum oksit fazlarından olduğu ve kaplama süresinin oluşan fazın içeriğini etkilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca kaplama içerisinde zirkonyum ve oksijenin yanında silisyumun olduğu da tespit edilmiştir. Kaplama süresindeki artışla beraber kaplama kalınlığı doğrusal şekilde 5 μm 'den 135 μm 'ye, yüzey pürüzlülüğünün ise kaplama süresi ile artarak, 0,5 μm 'den 6,4 μm 'ye yükseldiği ifade edilmiştir. Altlık malzeme zirkonyumun 200 HV sertliğine karşılık, oksit kaplama tabakası sertliği yaklaşık 600 HV olarak ölçülmüştür ve mikrosertlik değerinde kaplama süresine bağlı olarak sistematik bir değişim görülmediği bildirilmiştir[7].

J.L.Xu ve arkadaşları, korozyon direncini artırmak için, alüminat solüsyonu içinde, mikro ark oksidasyon yöntemiyle biyomedikal NiTi alaşımı üzerine Al_2O_3 kaplama yapmışlardır. Mikro yapı SEM elektron mikroskobu ile, enerji yayılımı EDS cihazı ve TF-XRD cihazı ile incelenmiştir. %0.9'luk NaCl solüsyonu içindeki korozyon direnci açık devre potansiyeli, elektrokimyasal impedans spektroskobu (EIS) ve potansiyodinamik kutuplama yöntemleriyle bulunmuştur. Sonuç olarak, kalınlığı 4 μm olan iyi yapılanmış kaplamanın sadece Al_2O_3 kristal fazından meydana geldiği ve yüzeydeki Ni yoğunluğu %3.33'olduğu tespit edilmiştir. EIS ve potansiyodinamik kutuplama testinin sonuçlarına göre, kaplanmış yüzeyin korozyon direncinin kaplanmamış yüzeye göre 40 kat daha fazla olduğunu ifade edilmiştir[8].

Arslan ve arkadaşları çalışmalarında yüksek sıcaklıklarda daha yüksek aşınma direnci elde etmek için alüminyum altlık malzeme üzerine Al_2O_3 seramik kaplama yapmışlar ve pin-on disk yöntemiyle aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada alüminyum oksit kaplama mikro ark oksidasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Yapılan kaplamanın yapısal analizi SEM ve XRD analizleriyle incelenmiş, sertlik ölçümleri ise mikrosertlik cihazı ile

belirlenmiştir(sertlik ne olmuş aşınma nasıl değişmiş) . Aşınma oranı ve aşınma sabiti, aşınma test sıcaklığı arttıkça azalmıştır. En düşük aşınma oranı ve aşınma sabiti, 200°C’de elde edilmiştir[9].

Li ve arkadaşları çalışmalarında Al6063 altlık malzemeyi mikro ark oksidasyon yöntemiyle borat elektrolit sıvı içinde kaplamışlardır. Alüminyum kaplamanın mikro yapı ve faz yapısı, element dağılımı ve mikrosertliği XRD ve SEM, EDX analizleri ve mikro sertlik test cihazıyla incelenmiştir. Kaplanan numunelerin neredeyse tamamı alfa-Al₂O₃ ve gama-Al₂O₃’ten oluşmuş ve üzerinde çatlaklar ve deliklere rastlanmıştır. Yapılan mikro sertlik deneyi, kaplamanın mekanik uygulamalar için yeterli yüksek sertliğe sahip olduğunu göstermiştir[10].

Zhu ve arkadaşları çalışmalarında Al-Si alaşımı üzerine mikro ark oksidasyon yöntemiyle seramik kaplama yapmışlardır. Mikro ark oksidasyon kaplama ve altlık malzemenin aşınma testleri 50N’luk normal yük altında ve 2 ila 40 µm arasında değişen yer değiştirme genliği şartlarında yapılmıştır. Numunelerin dinamik ve mikroskobik analizleri LCSM ve SEM yöntemleriyle detaylı olarak yapılmıştır. Kaba ve gözenekli yüzey yapısından dolayı kaplamanın sürtünme katsayısının, alaşımlı altlık malzemenin ilk durumundaki sürtünme katsayısından daha yüksek çıktığı bildirilmiştir. Çevrim sayısının artmasıyla, kaba ve gözenekli yüzey, pürüzsüz bir yüzeye dönüşmeye başlamıştır. Ayrıca kararlı haldeki sürtünme katsayısı, altlık malzemenin sürtünme katsayısının altına düşmüştür. Sonuç olarak, her iki sürtünme rejimi için katmanlara ayrılma, ana aşınma mekanizması olmuştur. Bu yüzden MAO kaplamanın, sürtünme aşınmasını azaltması için yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir[11].

Gang ve arkadaşları çalışmalarında alüminyum alaşım üzerine NaAlO solüsyonu içinde mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplama yapmışlardır. XRD sonuçları kaplama kalınlığının tümünün alfa-Al₂O₃ ve gama- Al₂O₃’ten meydana geldiğini ve kaplamanın %64±4 alfa-Al₂O₃’ten oluştuğunu göstermiştir. Kaplama, iç tabaka ve dış tabaka(porozite oranı %7-10) olmak üzere birbiriyle bağlantılı iki tabakadan meydana gelmiştir. Kaplamanın yoğunluğu 3,47g/cm³; en yüksek sertliği 22 GPa ve elastisite modülü 279 GPa’dır. Kaplamanın termal genleşme katsayısı 7,38x10⁻⁶ K⁻¹ olarak ölçülmüştür[12].

Tian ve arkadaşları, bu çalışmalarında alüminyum üzerine mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplamayı incelemişlerdir. Kaplamanın faz kompozisyonu XRD, SEM ve XPS analizleriyle incelenmiştir. Kaplamanın aşınma önleyici davranışı çizik test cihazı, pistonlu test cihazı ve Timken test cihazı ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar kaplama üzerinde porözlü, çoğunluğu gama-Al₂O₃’ten meydana gelmiş daha yüksek soğutma oranıyla üretilen birinci

bölge; daha yoğun ve çoğunlukla alfa- Al_2O_3 'ten meydana gelmiş ve daha düşük soğutma oranıyla üretilen ikinci bölge olmak üzere iki farklı bölge olduğunu göstermiştir[13].

Nie ve arkadaşları mikro ark deşarj oksidasyon olarak da bilinen plazma elektroliz tekniği ile Al-6082 altlık malzeme üzerine kalın ve sert oksit seramik kaplama yapmışlar ve bu kaplamayı incelemişlerdir. Yapılan bu kaplamanın mikro yapısı XRD, SEM ve EDX analizleriyle incelenmiştir. Ayrıca çalışmalarında yapışma, tribolojik kayma ve darbe aşınma testleri de yapmışlardır. Al-Si-O kaplamanın sertliği 2400 HV olarak ölçülmüş ve ayrıca çok iyi bir aşınma direnci ve yük taşıyıcı olduğu anlaşılmıştır. Tribolojik performans açısından, kayma, çizilme ve darbe testlerinde en iyi performansı kalın kaplamalar gösterirken, ince kaplamalarda sürpriz bir şekilde hem darbe hem de kaymaya karşı iyi bir performans göstermişlerdir. Deneylerdeki orta kalınlıkta kaplamalar tüm tribolojik testlerde nispeten zayıf bir performans göstermiştir[14].

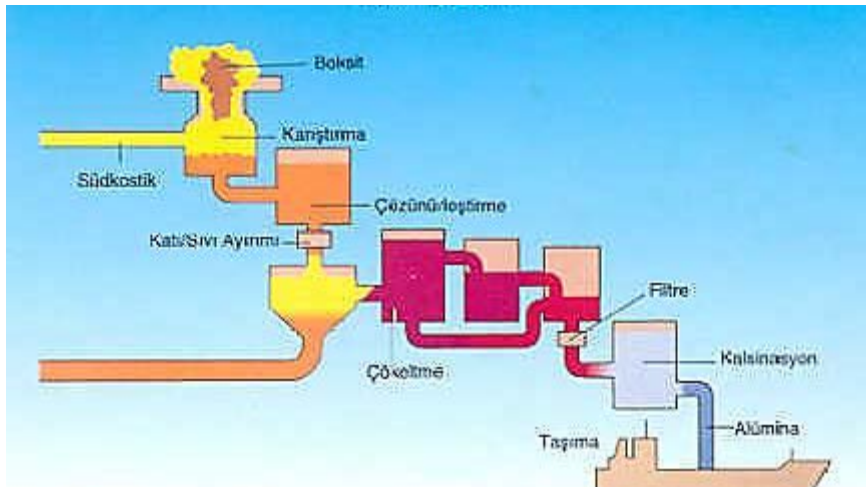
Literatür araştırması incelendiğinde alüminyum altlık malzemeler üzerine Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama işlemi yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genellikle farklı altlık malzemeleri üzerine farklı konsantrasyon solüsyonlarında Al_2O_3 ve TiO_2 kaplama üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı ise sodyum aliminat, potasyum hidroksit ve sodyum fosfat solüsyon karışımı kullanılarak alüminyum altlık malzeme üzerine Al_2O_3 kaplanması ve bununla beraber solüsyona 0,8 gr/lit Ti ilave edilerek Al_2O_3 kaplamaya titanyumun etkisi incelenmesidir. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak kaplama parametrelerinden frekansın kaplama yapısına, yüzey pürüzlülüğüne ve aşınma miktarına etkisi de incelenmiştir.

2 GENEL BİLGİLER

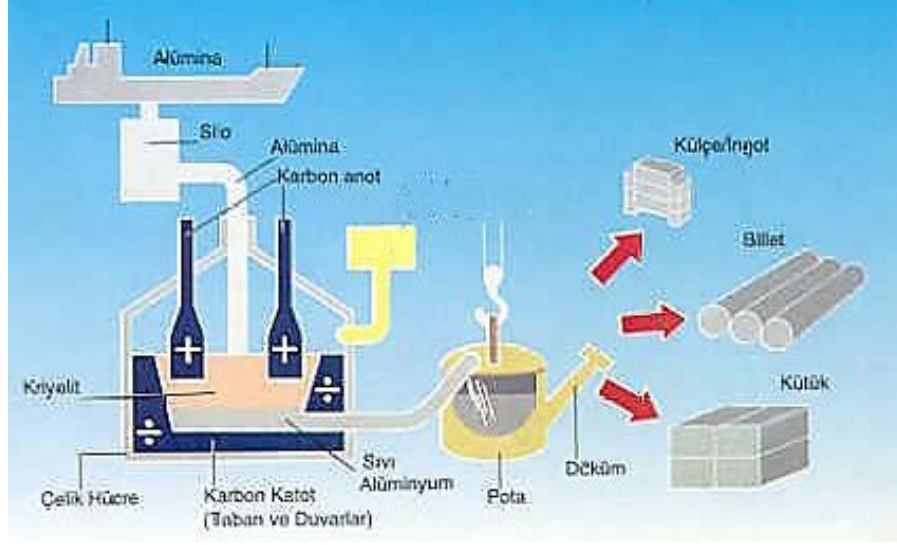
2.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Buna rağmen alüminyumun endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında Charles Martin Hall ve Fransa 'da Paul T. Heroult'un birbirlerinden habersiz olarak uyguladıkları elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Günümüzde de halen kullanılmakta olan bu yöntem alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886 yılında Werner Von Siemens'in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K.J.Bayer'in boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer Prosesini geliştirmesi ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmıştır. Alüminyum en genç metal olup, demir-çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metaldir. Bu metal 19. yüzyıldan itibaren tüm dünyada aynı yöntemle elde edilmektedir[15].

Alüminyum iki aşamada elde edilebilmektedir. Birinci aşamada, madenden çıkarılan boksit cevheri Bayer metodu ile, kostik eriyiği ile işlem görerek alüminyum hidroksit elde edilir. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan ve erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile "alümina" (alüminyum oksit) elde edilir (Şekil 1). İkinci aşamada ise beyaz bir toz görünümündeki alüminyum oksit, elektroliz işleminin yapılacağı ve hücre adı verilen özel yerlere alınarak sıvı alüminyuma dönüşür (Şekil 2). Burada amaç alüminyumu oksijenden ayırmaktır[15].



Şekil 1. Boksitten alüminanın elde edilişi[15]



Şekil 2. Alüminadan alüminyumun elde edilişi[15]

Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanır. Elektroliz işleminin sonucunda dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır. Genel olarak 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir[15]. Yukarıda söz edilen işlemlerden elde edilen alüminyum “birincil alüminyum” olarak tanımlanır. Alüminyuma ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyuma ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler[15]

Sembol	Al
Atom No	13
Atom Ağırlığı	27
Yoğunluk	2,7 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	660°C
Kaynama Sıcaklığı	2300°C
Elastiklik Modülü	65000N/mm ²
Genleşme Katsayısı	23,8 10 ⁻⁶ /K
Çekme Dayanımı	40...180 N/mm ²
Kopma Uzaması	% 50...4

Bazı alüminyum alaşımlarının akma sınırı değerleri 500 MPa değerini geçmektedir ki bu değer pek çok çelik türünün akma sınırı değerlerinin üzerindedir. Alüminyum alaşımları bu özelliklerinden dolayı, özellikle hafiflik istenen uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği, bakıra göre daha azdır. Fakat spesifik elektrik iletkenliği (elektrik iletkenliği/yoğunluk) ve spesifik ısı iletkenliği (ısı iletkenliği/yoğunluk) değerleri karşılaştırıldığında bakırdan daha iyi olduğu görülür. Bundan dolayı, hava elektrik hatlarında alüminyum alaşımları kullanılır. Ayrıca alüminyum fiyatının bakıra göre daha düşük olması ve korozyon ortamlarda alüminyum yüzeyinin bir oksit tabakası ile kaplanarak, korozyona karşı dayanıklılığının sağlanması önemli avantajıdır. Fakat alüminyum alaşımlarının içerisinde bulunan diğer elementler alüminyum ile galvanik pil oluşturmaya uygun olduklarından dolayı, korozyon açısından alüminyumun mümkün olduğu kadar saf olarak kullanılması tavsiye edilir. Bununla beraber mekanik özelliklerindeki dayanım düşüklüğü nedeniyle uygulamalarda saf Al kullanımı yaygın değildir[16].

Alüminyumun, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti iyidir. Ekstrüzyon yöntemiyle çok karışık geometrik yapıya sahip alüminyum profiller üretilir. Kalınlığı bir kaç mikrona ulaşılabilen folyalar üretilerek paketlemede işlemlerinde kullanılabilir. Gıda endüstrisinde kullanılan paketleme folyaları saf alüminyumdan yapılır. Alüminyum, elektrolitik olarak oksitlendirilerek değişik renklerde üretilir. Elokso denilen bu işlem ile hem korozyona dayanıklı, hem de değişik renklerde mimaride kullanılan profiller üretilerek pencere, kapı vb. yapısında kullanılabilir. Bazı durumlarda sertliği ve dayanımı yüksek alüminyum alaşımlarının üstü saf alüminyum ile kaplanarak korozyon özellikleri iyileştirilebilmektedir (Can, 2006). Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısı işlem uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma aşağıdaki Tablo 2’de gösterilmiştir[16].

Alüminyum alaşımlarına yapılan ısı işlemleri farklı şekillerde uygulanabilir ve ısı işlem yapılmış alüminyum malzemelerinde alaşım numarasının yanına ısı işlem seri numaraları da yazılır. Alüminyum malzemelerin ısı işlem seri numaraları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması[16]

Alaşımların Simgesi	Alaşım Elementi	Açıklama
1XXX	Saf alüminyum	Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır
2XXX	Cu	Yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
3XXX	Mn	Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.
4XXX	Si	Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.
5XXX	Mg	Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.
6XXX	Mg-Si	Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.
7XXX	Zn	Bu seri, Al alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.
8XXX	Li	Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir

2.1.1 Alüminyum 7075 Alaşımına Ait Özellikler

Al-Mg-Zn-Cu alaşımı olan Al-7075-T651, yüksek mukavemetin, korozyona direncin ve hafifliğin tercih edildiği yerlerde kullanılan alüminyum serisidir. Havacılık, gemi sanayi, otomotiv endüstrisi ve ordu donanım malzemesi olarak kullanılır. T6/T651 temper ise işlenebilirliği arttırarak kalıp malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarında yapılan ısıl işlem türü de ek olarak belirtilir(Tablo 3).

Yoğunluk oranına bağlı olarak yüksek direnci amacıyla, havacılık endüstrisinde oldukça geniş uygulama alanlarına sahip olan alüminyum alaşımları [Zhao T, Jiang Y., 2008], son yıllarda havacılık endüstrisinde ısı davranışları konusunda da dikkate değer bir davranış göstermiştir. Isıl işleme bağlı olarak yüksek dayanım özellikleri sergileyen alüminyum alaşımları içerisinde 7XXX serisi 7075 Al alaşımları dikkati çekmektedir. [R. Clark Jr, B. Coughran, I.Traina, A.Hernandez, T.Scheck, C.Etuk, J.Peters, E.W.Lee, J.Ogren, O.S.Es-Said., 2005]. 7xxx serileri içerisinde çinko %1-8 arasındaki miktarı ile temel alaşım elementini içerir ve daha ufak yüzde oranlarında magnezyum ikinci sırada bulunur. Bu iki alaşım çifti ısıya dayanıklı ve çok yüksek dayanımlara sahip bir alaşımı oluştururlar.

Genellikle diğer elementler, bakır ve krom gibi çok ufak miktarlarda bulunmaktadır. 7xxx serisi alaşımlar, hava çerçevesi yapıları, hareketli cihazlar ve diğer oldukça yüksek gerilime maruz parçalarda kullanılmaktadırlar [ASM Handbook, 1990]

Tablo 3. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem seri numaraları (Brandes, 1998)

Kod	Uygulanan İşlem
F	Fabrikasyon hali
O	Tavlanmış (en yüksek süneklik, en düşük dayanım)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1	Sadece soğuk şekillendirilmiş
H2	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3	Soğuk şekillendirilmiş ve kararlı hale getirilmiş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
T5	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T351	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış. Hadde ürünleri uygulamaları için geçerlidir.
T3510	T351 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb profilleri için
T352	Çözeltiye alınmış, sıkıştırma ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T651	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış. Hadde ürünleri uygulamaları için geçerlidir.
T6510	T651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb profilleri için
T73	Çözeltiye alma ve korozyon dayanımını artırmak için aşırı yapay yaşlandırma uygulanmış
T7651	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş, korozyon dayanımını artırmak için yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.
T76510	T7651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için

2.1.2 Alüminyum 7075 Alaşımına Ait Özellikler

Al-Mg-Zn-Cu alaşımı olan Al-7075-T651, yüksek mukavemetin, korozyona direncin ve hafifliğin tercih edildiği yerlerde kullanılan alüminyum serisidir. Havacılık, gemi sanayi, otomotiv endüstrisi ve ordu donanım malzemesi olarak kullanılır. T6/T651 temper ise işlenebilirliği arttırarak kalıp malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarında yapılan ısıtıl işlem türü de ek olarak belirtilir (Tablo 3).

Alüminyum alaşımları yüksek direnci sebebiyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl işleme bağlı olarak yüksek dayanım özellikleri sergileyen alüminyum alaşımları içerisinde 7XXX serisi 7075 Al alaşımları dikkati çekmektedir. [67]. 7xxx serileri içerisinde çinko %1-8 arasındaki miktarı ile temel alaşım elementini içerir ve daha ufak yüzde oranlarında magnezyum ikinci sırada bulunur. Bu iki alaşım çifti ısıya dayanıklı ve çok yüksek dayanımlara sahip bir alaşımı oluştururlar. Genellikle diğer elementler, bakır ve krom gibi çok ufak miktarlarda bulunmaktadır. 7xxx serisi alaşımlar, hava çerçevesi yapıları, hareketli cihazlar ve diğer oldukça yüksek gerilime maruz parçalarda kullanılmaktadırlar [68]

Tablo 4. Al7075 alaşımının mekanik özellikleri[17]

Isıl İşlem	Çekme Dayanımı, MPa	Akma Dayanımı, MPa	Uzama Dayanımı %	Kesme Modülü MPa	Elastisite GPa
T651	572	503	11	331	72
T7351	503	434	13	303	72
T7651	503	434	13	303	72

Tablo 5. Al7075 alaşımın kimyasal kompozisyon aralıkları[18]

Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
Minimum	-	-	1,2	2,1	-	0,18	5,1	-
Maximum	0,4	0,5	2	2,9	0,3	0,28	6,1	0,2

2.2 Metallerin Kaplanması

Kaplama metallerin yüzeyine bir takım yeni özellikleri kazandırmak ya da dekoratif açıdan daha çekici kılmak amacıyla yapılan yeni bir yüzey tabakası oluşturma işlemidir. Yüzey kaplama işlemi; aşınmayı, yıpranmayı, darbeyi, erozyonu azaltmak ya da bozulan parçaların tamiri gibi önemli işlevleri yerine getirmesinin yanında dekoratif açıdan malzemeyi çekici kılma amacıyla yapılabilmektedir. Aynı zamanda yüzey kaplama işlemleri, taban malzemenin kitlesel olarak sahip olmadığı nitelikleri yüzeyine kazandırmakta, daha ucuz ve daha kolay üretilen bir malzemenin sadece yüzeyinin özelliklerini değiştirerek istenilen amaca ulaşabilmesini de sağlamaktadır. Günümüzde malzeme yüzeylerinin değiştirilmesine yönelik işlemler “yüzey ve altlık malzemenin tasarımını bir arada ele alan ve bu ikisinin tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri ekonomik olarak sağlayabilen işlemler” olarak tanımlanır[19].

Altlık malzemesinin yüzeyine yeni özellikleri kazandırmak için yapılan işlemleri;

- Kaplama yolu ile (metal-alaşım-bileşik-seramik kaplama, organik kaplama, boya vs., inorganik kaplama cam, beton, emaye gibi)
- Bir başka maddenin yayındırılması ve taban malzeme ile bileşik oluşturma yolu ile (nitürleme, karbonitürleme, borlama, karbürleme)
- Taban malzemenin kendisinden kaynaklı oksit katmanlarının kalınlaştırılması ile (alüminyumun, titanyumun anodizasyonu)
- Taban malzemenin kendisinden kaynaklı oksit katmanlarının başka maddelerle reaksiyona sokularak daha dayanıklı kılınması (kromlama, fosfatlama gibi) yollardan herhangi biri ile yapılabilir[19].

Yüzey işlemlerinin en önemli avantajı yüzey-ortam etkileşimine dayanan mühendislik özelliklerinin ilave işlemlerle taban malzemenin yüzeyine yapılacak istenilen şekilde değiştirilebilmesidir. Örneğin TiN kaplamalar yüksek mekanik özellikleri, mükemmel aşınma ve korozyon direnci özelliklerine sahip olmalarından dolayı hem kesici takım malzemesinin ve hem de implant malzemesinin ömrünü uzatır. Bir başka örnek ise Cr-Ni esaslı bir paslanmaz çeliğin Co esaslı süper alaşım ile kaplanması malzeme yüzeyini daha sert ve aşınmaya karşı daha dayanıklı bir yüzey haline getirmiştir. Bu sayede hem korozyona hem de aşınmaya maruz bölgelerde kullanılan iş parçaları daha uzun ömürlü olarak yer edinmektedir[20]. Metallere yüzeylerine yapılan ilave işlemlerin amaçlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Korozyon direncini arttırmak
- Aşınma direncini arttırmak
- Yüzeyini sertliğini arttırmak
- Yüksek iletkenlik ya da kontrollü direnç sağlamak,
- Manyetik özellikleri iyileştirmek
- Dekoratif açıdan daha yüzeyi daha çekici kılmak
- Boyanacak malzemelerde boyanın yüzeye iyi yapışmasını sağlamak

Kaplama işlemine geçmeden önce kaplanacak yüzeylerin temizlenmesi ve hazırlanması gereklidir. Bu işlemler kimyasal ve mekanik olarak gerçekleştirilir. Mekanik işlemler, tel fırça ile fırçalama, kumlama, aşındırma gibi yöntemleri kapsar. Kimyasal yolla ise, solvent yardımıyla, alkaliler ve asitler ile temizleme yapılabilir[21].

2.3 Yüzey Kaplama Malzemeleri

Yüzey kaplama malzemeleri çok çeşitli alaşımlar, karbürler ve bu malzemelerin bileşimlerinden oluşur. Geleneksel yüzey kaplama alaşımları ince tabaka yüzey kaplama malzemeleri olarak da kullanılabilirler. Bu malzemeler, çelikler veya düşük alaşımlı demir esaslı malzemeler, yüksek kromlu beyaz dökme demir veya yüksek alaşımlı demir esaslı malzemeler, karbürler, nikel esaslı veya kobalt esaslı ve titanyum alaşımlar olarak sınıflandırılabilirler. Bazen az miktarda bakır esaslı alaşımlar yüzey kaplama işlemlerinde kullanılabilirler; fakat birçok parçada yüzey kaplama alaşımları demir, nikel ve kobalt esaslıdır. Yıllık yüzey kaplama alaşım tüketimi 18×10^6 kg'dır. Bunun %90'ı demir esaslı alaşımlardır. Mikro yapısal olarak yüzey kaplama alaşımları genellikle borürler, karbürler gibi sert çökelti fazlarının daha yumuşak demir, nikel ve kobalt esaslı alaşımlardan oluşan bir matris içinde yer aldığı bir kombinasyondur. Karbürler, demir ve kobalt esaslı yüzey kaplama alaşımlarında sert faz olarak bulunurlar. Demir ve kobalt esaslı sert yüzey alaşımlarında karbon içeriği ağırlıkça %4 civarındadır. Birçok kobalt, nikel ve yüksek oranlı demir esaslı sert yüzey kaplama alaşımları genellikle %35 üzerinde krom, %30 üzerinde Mo ve %13 üzerinde W ve az miktarda Si ve Mn içerir[22].

2.4 Kaplama Türleri

Yüzey kaplama işlemleri çeşitli amaçlar için farklı türlerde yapılır. Bunlar sırasıyla sert yüzey kaplama, kademeli kaplama, dolgu kaplama ve koruyucu kaplama işlemleri olarak yer almaktadır[22].

2.4.1 Sert Yüzey Kaplama

Aşınma, çizilme, çarpılma, erozyon ve korozyon azaltmak amacıyla uygulanan bir yüzey kaplama işlemidir. Nispeten ince tabakalar (≤ 3 mm) için uygulanır. Sert yüzey kaplama, dolgu kaplama işlemine göre daha ince bir yüzey tabakası oluşturur ve normalde onarımın ve aşınma direncinin olduğu durumlar için uygundur. Kaynak, ısıl püskürtme veya benzeri kaynak yöntemleri için gerekli yüzey şartı, ısıl işlemler veya alevle yüzey sertleştirme, nitrüleme veya sert yüzey kaplama işlemi olan iyonlama gibi işlemlerle yapılan sert yüzey elde etme işlemlerinden farklıdır. Korozyon ve/veya yüksek sıcaklıkta meydana gelen tufallaşma, aşınma oranında ana etkiye sahip olmakla beraber sert yüzey kaplamalar için doğru malzeme seçiminde önemli bir faktör olabilir[22].

Aşınma kontrolü için yapılan sert yüzey kaplamalar çok geniş bir alanda kullanılır. Başlıca kullanım alanları taş kırma ve ezme makineleri metal-metal aşınmasını minimuma indirmek için gerekli yerler sayılabilir. Sert yüzey kaplama abrasif aşınmayı kontrol etmek için de kullanılır. Bunlar haddelerde, kazıma takımlarında, ekstrüzyon vidalarında, kesme makaslarında, toprak işleri makinelerinin parçalarında ve kırma makinelerinin parçalarında rastlanmaktadır. Bu kaplamalar aynı zamanda yağlanmamış veya zayıf birbiri üzerinde kaygan metal-metal temasının olduğu kontrol valfleri, kepçe ve traktörlerin iniş takımları ve yüksek performans bilyelerinde kullanılmaktadır[22].

2.4.2 Dolgu Kaplama

Parçanın istenilen boyuta geri getirilebilmesi için ilave kaynak metalinin ana metal üzerine kaynak yöntemi ile kaplanmasıdır. Bu işlemler genellikle aşınmaya karşı direnç için değil aşınmış parçaları yeniden kullanılabilir hale getirmek veya orijinal boyutlarına geri getirmek ya da aşınma etkisine maruz kalan tabakaya uygun destek sağlamak için yapılır. Dolgu kaplama terimi genellikle 3 mm' den daha kalın kaplamalar için kullanılır. Amacı

yüzeye korozyon direnci sağlamaktır. Sert yüzey kaplamaya göre biraz daha kalın kaplama kalınlığına sahiptir. Dolgu kaplama yapılmış ana metal parçalar için, düşük alaşımlı çelik basınçlı kazanlar, üre reaktörleri, tüp levhalar, kâğıt kazanları, nükleer reaktör kazanları, hidrolik kırma makineleri örnek olarak verilebilir. Kaplama malzemesi genellikle östenitik paslanmaz çelik veya nikel esaslı alaşımlardır. Ancak bazen bakır esaslı alaşımlarda kaplama amaçlı kullanılabilir. Bazı özelleşmiş kaplamalar gümüş dolgu metali kullanılarak da yapılabilir. Dolgu kaplama genellikle sualtı ark kaynak yöntemi kullanılarak yapılır. Dolgu malzemesi olarak örtülü elektrotlar, halka şeklinde kaynak telleri ve çıplak elektrotlar kullanılabilir[22].

2.4.3 Koruyucu Kaplama

Düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çelik malzemeye korozyona karşı dirençli yüzey tabakası sağlamak amacıyla uygulanır. Genellikle kalın tabakalar ($\geq 3\text{mm}$) korozyona dirençli sert yüzey tabakası elde etmek için uygulanır. Elektrik ark, toz altı, gaz altı ve plazma püskürtmeli kaynak yöntemleri kullanılabilir. Koruyucu kaplama tekniği ana malzemenin yüzeyine istenilen özellikleri kazandırmak için mükemmel bir yöntemdir[22].

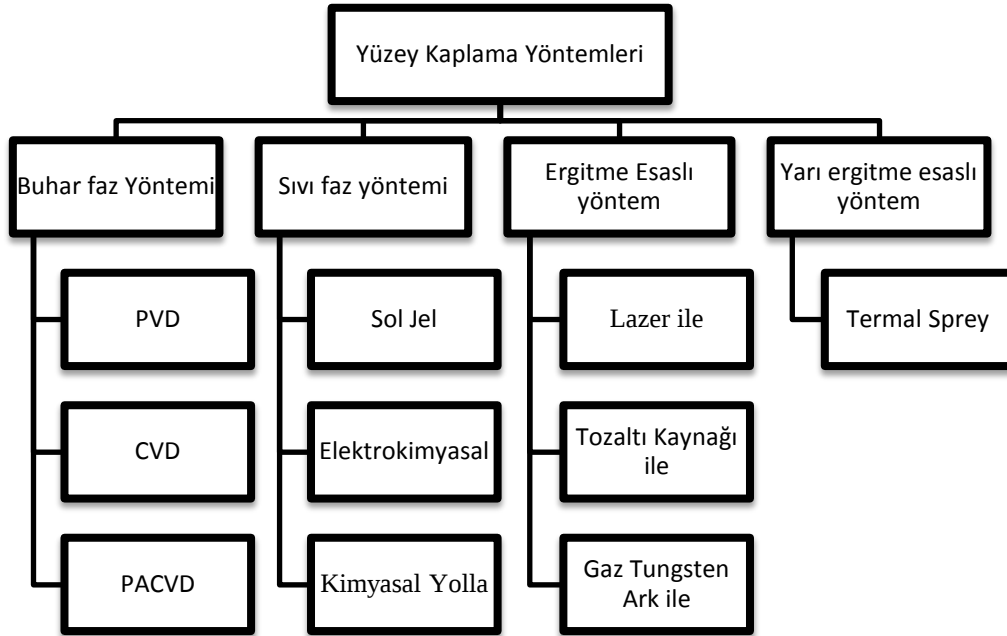
2.4.4 Kademeli Kaplama

Asıl yüzeye bir veya birden fazla kaynak metal tabakasının kaplanmasıdır. Bu yöntemin koruyucu kaplama yönteminden farkı bazı metalürjik gereksinimlere ulaşabilmesidir. Bu yöntem, gerçekte farklı metal-ana metal birleştirmeleri için uygulanır. Eğer östenitik paslanmaz çelik dolgu malzemesinin ergimesi bir problem yaratıyorsa, karbon veya düşük alaşımlı bir çeliğin yüzeyine 309 veya 310 tipi bir veya iki tabaka bir paslanmaz çelik kaplanacağı zaman ilk kademe kaplama katı iyi kontrol edilebilmelidir. İşlendikten sonra ve kaplandıktan sonraki muayene, kademeli kaplanmış çelik parça ile paslanmaz çelik ana metal kaynağı için uygun dolgu metali kullanılarak yapılabilir. Düşük alaşımlı çelik bir parça kademeli kaplamadan sonra ısıtılabilir ve sonra paslanmaz çelik parçaya birleştirilir. Bu yöntem, östenitik paslanmaz çeliği tane sınırı aşınmasına karşı hassas hale getiren daha sonraki kaynak ısıtılmasından korur[22].

2.5 Yüzey Kaplama Yöntemleri

Yüzey kaplama, malzemelerin yüzeylerinde buhar biriktirme, sol-jel, elektrolitik yöntemler ve çeşitli ergitme işlemlerinin kullanılarak değişik şekillerde yapılır. Kaplama sonrası malzeme yüzeyinde aşınma direnci, sertlik artışı ve korozyon direnci gibi tribolojik olaylara karşı daha dayanıklı bir tabaka elde edilir. Kaplamalar malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılır. Kaplama yöntemleri diğer yüzey işlemlerinin malzemelerin özelliklerini geliştirmede yetersiz kalmaları yüzünden geliştirilmiştir[23]. Malzemelerin korozyon ve aşınma direncini gibi özellikleri iyileştirmek amacıyla yapılan yüzey kaplama yöntemleri Tablo 6'deki gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 6. Yüzey Kaplama Yöntemleri



2.5.1 Buhar (Gaz) Fazı Yöntemiyle Kaplama

Bu yöntemlerde; malzemelerin yüzeylerinde sert kaplamalar elde etmek için, çeşitli yöntemlerle elde edilen kaplama malzemesi buharları iş parçası yüzeyinde biriktirilir. Buhar fazı yöntemleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olup, bu iki temel yöntemin çeşitli varyasyonları mevcuttur. Bu yöntemler temelde üç adımda gerçekleşir[23]. Bu adımlar;

- 1.Kaplama malzemesinin buhar fazının oluşturulması

2. Oluşan buharın kaplanacak malzemeye taşınması,
3. Buhar fazın malzeme üzerinde yoğunlaşması ve ince katı tabakasının oluşması

2.5.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi

Buhar fazı lazer yöntemiyle, elektrolitik yöntemle, plazma püskürtmeyle ve patlamalı püskürtme yöntemiyle sağlanabilir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD) işlemlerinde kaplama buharı, kaplama malzemesinin ısıtılması ile yapılan buharlaştırma ile ya da kaplama malzemesinin yüksek enerjili partiküllerle bombardımanı sonucunda malzemeden kopan ve yerinden çıkan partiküllerle sağlanan iyon söktürme işlemleriyle oluşturulur. Bazı PVD işlemlerinde buhar iyonize olur veya gaz ya da plazma ile tepkimeye girerek ana malzemeye bu şekilde ulaşır. Böylece oluşturulan film tabakanın bileşimi ya da yapısı değiştirilir[23,24].

2.5.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) işlemlerinde ise, kolay buharlaşan bir kaplama malzemesi ile bir gaz, termal ya da diğer yöntemlerle malzemenin yakınında tepkimeye sokulur. Oluşan buhar, katı bir şekilde sıcak ana malzeme üzerinde biriktirilir. PVD ve CVD metotları kullanılarak metaller, alaşımlar ve refrakter bileşikler gibi çok geniş aralıktaki bir malzeme grubuna değişik kaplamaların yapılması mümkündür. Bu yöntemlerde biriktirme miktarı, diğer kaplama işlemlerine göre biraz düşüktür. Bazı iyon demetli söktürme ya da iyon kaplama işlemleri için biriktirme miktarı $<0.1 \mu\text{m/dak}$ olurken, CVD işlemleri ya da aktivasyonu arttırılmış buharlaştırmalar için bu değer $25 \mu\text{m/dak}$ 'ya kadar çıkmaktadır[23,24].

2.5.1.3 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PACVD) Yöntemi

PVD işlemlerinin çoğu vakum altında yapılır. CVD işlemleri ise atmosferik basınçtaki bir reaksiyon kutusunda yapılabilir. Plazma destekli-kimyasal buhar biriktirme (PACVD) elektrik boşalma plazmasıyla desteklenen bir buhar fazının katı bir film oluşturmasını içeren bir karma tekniktir. PACVD'nin diğer CVD işlemlerine üstünlüğü düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi,

yüksek biriktirme miktarlarına ulaşılabilmesi ve bu teknikle daha geniş bir aralıkta çeşitli kaplamaların yapılabilmesidir[23,24].

Bu yöntemlerle hafif malzemelere uygulanan kaplamalarla imalat yükü azaltılmakta ya da performansı ve ömürleri geliştirilmektedir. Bunlara ilaveten, bu yolla yağlanmış temaslardaki sürtünme katsayılarına eşdeğer düşük sürtünme katsayılı ($\mu \approx 0.10-0.20$ olan) kaplamalar sağlanabilmektedir. Bu şekilde üretilen kesici uçlar, takımların ve makine parçalarının gerektirdiği yağlamayı azaltmakta ve çevreye olan zararı düşürmektedir. PVD ve CVD kaplamaların hafif metallere ve alaşımlarına uygulanmasında işlem sıcaklığının düşüklüğü nedeniyle kısıtlamalar söz konusudur[23].

2.5.2 Sıvı Faz Esaslı Yöntemlerle Kaplama

2.5.2.1 Sol Jel Yöntemi

Sol-jel teknolojisi yüksek kaliteli camları ve seramikleri üretmekte kullanılan önemli bir tekniktir. Sol-jel yöntemi; farklı altlık malzemelerin ve karmaşık geometrilili malzemelerin kaplanmasında sağladığı kolaylık, düşük işlem maliyeti ve düşük çalışma sıcaklığı gibi avantajlara sahiptir. Filmler, bir alt tabaka üzerine sol-jel çözeltisinde derin ve ağ biçimli çöktürme ve püskürtme (sprey) ile oluşturulabilir. Organik bileşenlerden uzak bir jel tabakası için ince film 70°C ' de kurutulur ve oluşan kristal tabaka, amorf tabaka ve kalıntı organik bileşenleri pirolize etmek için $400-700^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığına kadar ısıtılır[25]. Sol-jel teknolojisi önceden hazırlanmış bir tabakanın hidrolizinin oluşumu ve kısmen hidrolize olmuş ürünlerin bir oksit ağıyla birlikte yoğunlaşması esasına dayanan iki ana kimyasal reaksiyon içerir. Çözelti bir jel haline dönüştükten sonra kurutularak ve ısıl işleminden geçirilerek son yapı elde edilir. Sol-jel kaplamaların oluşturulmasında öncelikle ön çözelti ince bir tabaka şeklinde kaplama yüzeyine dağıtılır ve sol-jel dönüşümü başlar. Jel tabakası termal işlemlerle kuruma ve yoğunlaşma/kristalleşme aşamalarından geçirilir. Klasik sol-jel kaplama metotları karmaşık metal parçaların kaplanmasında yeterli olmamaktadır. Kaplama kalınlıkları tek daldırma ya da spin kaplamalarda $100-200$ nm düzeylerinde olmaktadır[26].

2.5.2.2 Kimyasal Yolla Kaplama

Kimyasal yolla kaplama kimyasal indirgenme, akımsız kaplama ve dönüşüm kaplama olmak üzere üç şekilde yapılır. Kimyasal indirgeme yoluyla kaplama, suda çözünen gümüş, altın ve bakır tuzlarının kuvvetli indirgeyici etkisi ile sulu ortamda indirgenmesi yoluyla cam (ayna yapımında olduğu gibi), plastikler ve metaller malzemeler kaplanabilmektedir[27].

Akımsız kaplama terimi, bir dış elektrik akımı kaynağı yardımı olmaksızın metal taban maddelerinin nikel veya kobalt alaşımları ile kaplamasının bir metodunu tanımlamak için ilk olarak Brenner and Riddell (1946) tarafından ifade edilmiştir. Zaman içerisinde bu terim, Mallory and Hadju tarafından (2005) bir sulu ortamda sürekli metalin kaplanmasının herhangi bir yolunu tanımlayacak şekilde genişletilmiştir.

Dönüşüm kaplamalar, metal yüzeyini korozyona uğratarak metale yapışık koruyucu bir korozyon ürünü oluşturarak yapılır. Metalin yüzeyi kimyasal olarak pasifleştirici oksit oluşturarak korunabilir. Kromatlaştırma bu tekniğin en önemlisidir. Kromatlaştırma, sülfat, nitrat, klorür, florür gibi aktifleyici anyonlar yanında kromat veya kromik asit içeren banyolar kullanılarak yüzeyin pasifleşmesi işlemidir. Kimyasal dönüşüm ile kaplamanın bir diğer örneği de fosfatlaştırmadır. Fosfatlaştırma işlemi, çözeltiye daldırılarak ya da çözelti püskürtülerek yapılır. Fosfat banyosuna oksitleyici maddelerin (nitrat ve klorat) eklenmesi işlemi hızlandırır. İnhibitör etkisi yüksek olan nitrite indirgenebilen nitrat ortama daha fazla eklenir. Korozyona dayanıklılıklarının artması için oluşturulan tüm fosfat filmleri seyreltik kromik asit çözeltisinde yıkanmalıdır[28].

2.5.2.3 Elektrokimyasal Yolla Kaplama

2.5.2.3.1 Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplama

Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama, bir elektrolit içerisine daldırılan altlık malzemenin elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeyin kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır[29,30]. Güç kaynağına altlık malzeme anot olarak, tank ise katot olarak bağlanır. Altlık malzeme aynı zamanda katot görevi gören tank içerisindeki elektrolitik banyoya daldırılır ve voltaj uygulanır. Bu voltaj nedeniyle plazma etrafını elektrotlar çevreler ve oluşan oksijen iyonları altlığa geçerek bir film tabakası oluşturur. Çevre dostu bir kaplama

yöntemi olan MAO, çok farklı mekanik ve fiziksel yapıya sahip kaplamaların özellikle Mg, Ti, Al gibi malzemeler ve alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına imkân tanımaktadır.

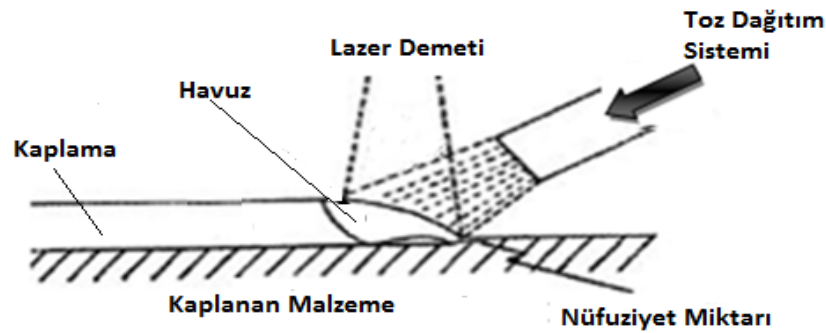
Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile ilgili daha fazla bilgi Bölüm 2.6’da ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.5.3 Ergitme Esaslı Kaplamalar

Bir iş parçasının genel olarak dış yüzeyinin sert ve iç kısmının ise sünek bir yapıda olması istenir. Böylece dış tabakanın aşınma ve korozyon gibi etkilere dayanıklı olması sağlanırken, parçanın iç kısmı gelen yüklere karşı mukavemetli olmaktadır. Malzeme yüzeyinde böyle bir tabakanın elde edilmesi için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Yukarıda sıralanan bu amaç için kullanılan yöntemlerden birçoğu, istenen özelliklere göre kaplama yapılmasına imkân vermemektedir. Bu yöntemlerle oluşan yüzey tabakaları bazen çok ince olmakta ve aşırı sertlikleri nedeniyle çalışma şartlarında gelen darbelere karşı dayanıksızlık göstermektedir. Diğer yandan yöntemlerden bazılarının ilk yatırım veya uygulama maliyetleri oldukça yüksektir. Büyük boyutlu parçalar için yetersiz kalmaları da ayrı bir olumsuzluktur. Kaplamaların yapılmasında en önemli etkenler ısı kaynağı ve kaplama malzemesi olarak düşünülebilir. Kaplama işlemlerinde kullanılan ısı kaynağının ve kaplama malzemesi cinsi önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle kaplama işlemlerinin birçoğunda geleneksel kaynak yöntemleri esas alınmış ve malzemelerin yüzeyleri ilave metal ve alaşımları ile kaplanmıştır. Bu yöntemlerle ana malzeme yüzeyine ilave metal kullanılarak sert tabakalar yapılabilmekte, mevcut yüzeyin özellikleri değiştirilerek geçiştirilmekte ve aşınmış herhangi bir bölgenin tamiri yapılırken daha da güçlendirilmesi söz konusu olmaktadır. Malzeme yüzeyinde bu şekilde ilaveler yapılması için klasik kaynak tekniklerinden olan elektrik ark, tozaltı, ve gaz altı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. İlk yatırım maliyetleri ve uygulamaları pahalı olmasına rağmen, lazer ışını ve elektron ışını ile kaynak teknikleri de kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle uygulanan kaplamalarda genel olarak malzemede bozulma ve çarpılmalar, yüzey hassasiyetlerinin düzeltilmesi için talaşlı imalat ihtiyacının oluşması gibi dezavantajlar mevcuttur. Bu yöntemler diğer ergitme yöntemlerine göre daha yüksek aşınma, korozyon ve erozyon direnci gösteren bir kompozit tabakası oluşturulabilmektedir[23].

2.5.3.1 Lazerle Yüzey Kaplama Yöntemi

Bu kaplama yönteminde bir ısı kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. Hareketli alt tabaka üzerine istenen ilave metal ince bir tabaka halinde yüzeye geçirilir. Yüzeye geçişecek metal; alt tabaka üzerinde önceden hazırlanmış tozun enjeksiyonu, yüzeye toz püskürtülmesi ya da tel besleme yolu ile kaplanacak malzeme yüzeyine aktarılır. Bunların arasında en etkili yöntemin, toz enjeksiyonu yöntemidir. Lazer kaplama işlemine, metalik kaplama uygulamalarının katılması, imalat ve prototip üretiminde tam bir devrim olmuştur[31]. Şekil 3'te lazer kaplama tekniği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Lazer kaplamanın şematik gösterilişi

Lazer demetinin oluşturduğu elektromanyetik radyasyon geçirimsiz malzeme yüzeyi tarafından emilmektedir. Lazer demetinin hızındaki değişim malzeme yüzeyinde bir ısıl çevrime neden olur. Tüm lazer işlemlerinde hızlı katılaşmanın, düzgün ve hassas metalurjik yapı oluşumuna neden olduğu bilinmektedir. Lazer kaplama, lazer malzeme uygulamalarının en önemli olanlarından biridir. Lazer kaplamada, lazer demeti alt tabaka üzerindeki toz taneciklerini etkileyerek hareket eder. Sonuçta ilave edilen toz tanecikleri malzeme yüzeyinde kaplama seklinde ince bir tabakanın oluşmasını sağlar[31].

2.5.3.2 Tozaltı Kaynağı İle Kaplama Yöntemi

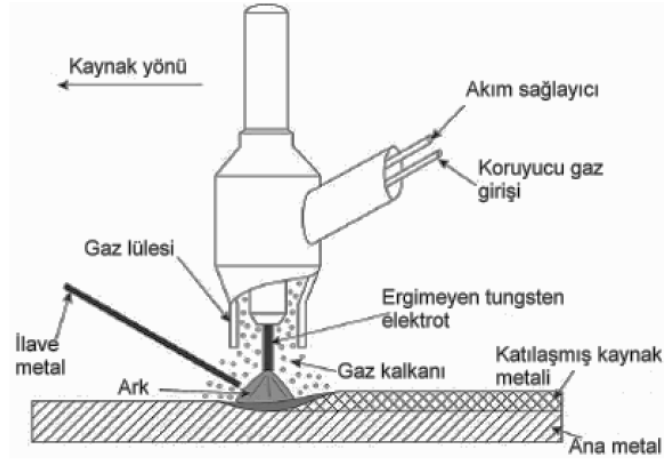
Tozaltı kaynak tekniğinde; sürekli beslenen çıplak bir tel elektrot ve birleşmenin üzerine ayrıca eklenen granül ya da toz halinde bir koruyucu bulunmaktadır. Ark bu toz tabakasıyla tamamen kapalı olduğundan yüksek akım değerleri çevresel ortamdan etkilenmeden rahatlıkla kullanılabilir. Bu yüksek akımlar sayesinde kaynak havuzu ana malzemeye çok derin olarak yayılabilmekte ve kalın kesitler herhangi bir kaynak ağız hazırlanmadan rahatlıkla

kaynak edilebilmektedir. Yapılacak işleme göre düşük akımlar, çok çeşitli kaynak hızları, koruyucu toz akısı ve tel kombinasyonları kolaylıkla ayarlanabilmektedir. İşlem sırasında ark gözükmediği için güvenli bir yöntemdir. Alternatif ve doğru akım kullanılarak birden çok tel ile işlem yapmak mümkündür. Doğru akım derin nüfuziyet sağlarken, alternatif akım ve ilave teller, yüksek kaynak metali birikmesine olanak sağlar. İşlem akımları 1000 A değerlerine kadar çıkabilir. Tozaltı kaynağında genellikle 400 A değerlerinde çalışılmaktadır. Çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan koruyucu tozların özelliklerine dikkat edilmeli ve işlem bittikten sonra yüzeyde oluşan yapıların taşlanarak giderilmesi gerekir. Tozların akışkan hale getirilmesinde genellikle asit karakterli malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde kaynakla birleştirilen çeliklerin; kırılma tokluğu, aşırı sertleşme ve hidrojen gevrekliğinden ileri gelebilecek çatlamalara karşı işlem sonrası kontrol edilmesi gerekir[23].

2.5.3.3 Gaz Tungsten Ark İle (GTA veya TIG) Kaplama Yöntemi

Gaz tungsten ark kaynağında ark, ergimeyen bir tungsten elektrotla is parçası arasında sağlanırken, koruyucu gaz olarak argon veya helyum kullanılır. Bu yöntemde ark ana malzemeyi eritmek için kullanılır ve gerekiyorsa ilave metal bir telle sağlanır. Genellikle alternatif akım alüminyum alaşımları ve doğru akım da demir alaşımları için kullanılmaktadır. İşlem elle veya mekanize bir şekilde yapılabilir. Bu yöntem düşük akımlı mikro plazma işlemine benzemektedir. GTA ile çeşitli malzemelerin çok hassas kaynakları yapılabilir[23].

Tungsten elektrot, ark işlemi için gerekli elektronların emisyonunu sağlamak amacıyla yeterince yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Ark bölgesinde meydana gelen elektromanyetik alan sayesinde elektrot ve parça arasındaki koruyucu gazın bir kısmı iyonlaşır. Bu yüzden ark bölgesinde gaz iletken ya da plazma haline gelir. Elektrik arkı, iletken hale gelen asal gazdan akımın geçmesiyle üretilir (Şekil 4). Basit olarak GTA kaynak kalitesi, kaynak havuzunun geometrisi ile karakterize edilir. Kaynak havuzunun geometrisi, kaynağın mekanik özelliklerini tespit etmede yaklaşık 2800°C' ye ulaşan kaynak sıcaklığı önemli rol oynar[32,33].



Şekil 4. Gaz tungsten ark kaynağının şematik olarak gösterilişi[34].

Bu yöntemde kullanılan cihazların pahalı olması ve koruyucu gazlarla çalıştığı için belirli bir çalışma alanı gerektirmesi dezavantajları arasında sayılabilir. Küçük parçaların kalın kaplamaları için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. İşlem esnasında yüzeyde çok yüksek sıcaklıklar oluşurken, işlem öncesi ve sonrasında oluşan sıcaklıklar düşüktür. Geniş bir malzeme grubuna çeşitli ilavelerle kaplama yapmak mümkündür[23].

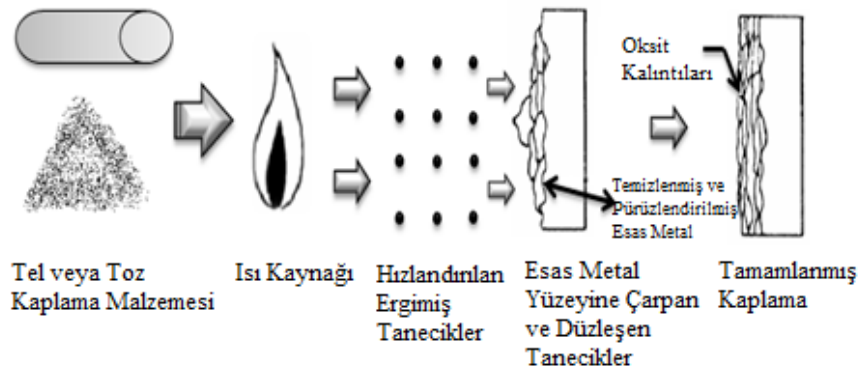
2.5.4 Yarı Ergimiş Fazdan Üretilen Kaplama

2.5.4.1 Isıl Püskürtme (Termal Sprey) Yöntemi

Termal püskürtme kaplama yönteminde; tel, çubuk veya toz şeklindeki kaplama malzemeleri bir püskürtme tabancasında yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazların yardımıyla püskürtülerek malzeme yüzeyinde bir kaplama katı oluşturulur. İşlemin yapılışı ve kullanılan malzemeye göre değişen farklı uygulamalar mevcuttur. Bunların arasında toz tel alev püskürtme, elektrik ark püskürtme, plazma püskürtme, patlamalı püskürtme (D gun) ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme bulunmaktadır. Bu yöntemlerle tungsten, alümina, krom karbür, nikel, titanyum ve demir esaslı tozlar gibi geniş bir aralıktaki kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Nikel ve kobalt esaslı krom, bor ve silisyum alaşımları, tungsten karbürü benzer malzemeler aşınma problemine karşı büyük gelişmeler sağlamıştır. Bu yöntemlerle aşınmaya karşı koruma, tamir amaçlı yüzey kalitesinin düzeltilmesi ve orijinal parça üretimi yapılabilmektedir. Termal püskürtme yöntemleri, havacılıkta (kompresör,

yanma odaları), kimya-petrokimyada (pompa, valf, kılavuz ve hadde parçalarında), otomotivde (piston, segman yatakları) ve medikal uygulamalarda (implant) yaygın olarak kullanılmaktadır[23].

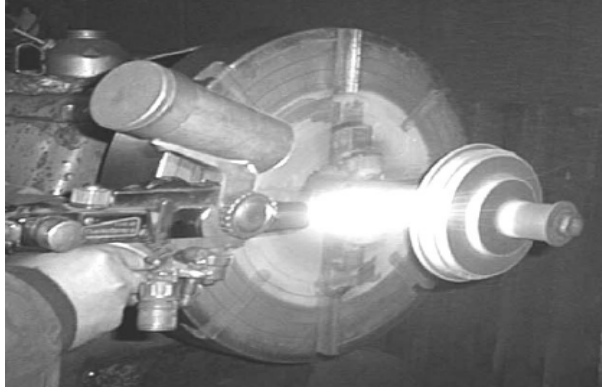
Termal püskürtme işlemleri; metaller, seramikler ve polimerler gibi çok çeşitli kaplama malzemelerinin çok farklı ana malzemeler üzerine yapılabildiği kaplama yöntemlerini içerir[23]. İşlem yapılırken kaplama malzemesinden ısı yoluyla elde edilen ergimiş ya da yarı ergimiş partiküller malzeme yüzeyine doğru hızlı bir şekilde gönderilir. Sonuçta yüzeyde oluşan bağlanma ve hızlı katılaşma ile bir kaplama yapısı oluşur. Kaplamanın sertliği işlem parametrelerine, kullanılan kaplama malzemesinin türüne ve ana malzemeye göre değişmektedir. Termal püskürtme yöntemleri farklı enerji kaynakları ve uygulama metotlarına sahip olmasına karşın, temelde dört ana kısımdan oluşur. Bunlar; ergimiş/yarı ergimiş partikülün taşınması, kaplama malzemesiyle temas, alt tabakaya ısı transferi ve kaplama tabakalarının katılaşması ve birbirine tutunmasıdır. Bu durum Şekil 5'te gösterilmiştir[23].



Şekil 5. Termal sprej yöntemiyle kaplamanın şematik gösterimi[35].

2.5.4.2 Alev Püskürtme Yöntemi

Bu püskürtme sistemi, yüzeye kaplanması düşünülen tel veya tozların, püskürtme memesi içerisinde ergitilerek kaplanacak olan alt malzeme yüzeyine püskürtülmesi şeklindedir. Yanıcı gaz-oksijen alevinde püskürtülen telin ergimesi için oldukça yüksek bir alev sıcaklığına ihtiyaç vardır. Bu durumda da ancak oksijen-yanıcı gaz alevi ile sağlanabilmektedir. Yanıcı gaz genellikle asetilen olup düşük ergime noktasına sahip malzemeler için bazen bütan/propan ve ince tozların püskürtülmesi durumunda hidrojen de kullanılmaktadır. Bütan ve propan gazlarının yerine tercihen asetilen gazının kullanılmasının sebebi ise, asetilenin daha yüksek alev sıcaklığına ve tutuşma hızına sahip olmasıdır(Şekil 6)[36].



Şekil 6. Alev püskürtme yönteminin torna tezgâhında uygulanması[37].

Alev püskürtme yönteminin düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı en önemli olan üstünlükleridir. Ancak, daha düşük bağlantı mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi ve düşük çalışma sıcaklığı yöntemin olumsuz olan özeliğidir. Bu yöntem, aşınmış veya tolerans dışına çıkmış parçaların yenilenmesi amacı ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüze kadar bir seri ısı püskürtme yöntemleri geliştirilmekle beraber bu yöntemlerden özellikle alev ile püskürtme yöntemi; düşük ilk yatırım maliyeti, kolay uygulanabilirliği ve düşük bakım masrafı ile uygulamada yaygın olarak kullanılmakta ve toz veya tel şeklindeki malzemeler püskürtülebilmektedir[38].

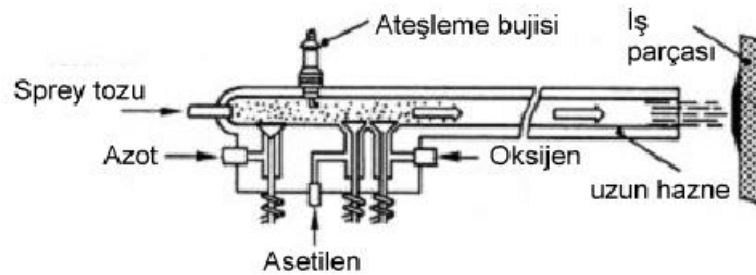
2.5.4.3 Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi

Yüksek hızlı oksji-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi ile, eriyik haldeki partiküller süpersonik hızlara çıkarılarak, kazandıkları kinetik enerji sayesinde yoğun, düşük gözenekli, yüksek yapışma mukavemetine sahip kaplamalar üretilebilir. HVOF sisteminde oksijen ve sıvı veya gaz haldeki yakıtın karışımı kullanılır[39]. Bu yöntemdeki en önemli fark gaz yakıtın yerine sıvı yakıt kullanımınıdır. İşlem, alev püskürtme işlemine benzer bir şekilde yapılmakta olup sıcaklık etkisi ile kaplama malzemenin ergitilmesi ve daha sonra kaplanacak malzeme yüzeyine gönderilmesidir. Ayrıca alevle püskürtme işleminde yanıcı-yakıcı gazın birleşimi tabanca dışında meydana gelmekte, buna karşın HVOF yönteminde ise tabanca içerisinde gerçekleştirilmektedir. Genleşen gaz jetinin nozul yardımı ile hızı daha da artar ve kaplama tabakası meydana getirecek tozun jete eklenmesi ile ses üstü (550-800 m/sn) bir hızda kaplama işlemi gerçekleştirilir[39]. Toz malzemenin kazandığı yüksek kinetik enerjiden dolayı tamamen ergimesine gerek yoktur. Parçacık yarı ergimiş halde ve plastik

deformasyona uğramış bir şekilde taban malzeme üzerine çarpar ve yüzeye yayılarak kaplamayı oluşturur. Diğer ısıl püskürtme yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu yöntemde kaplama, alt tabakaya daha iyi bağlanmakta, yüksek sertlik değerleri elde edilmekte ve daha az gözeneklilik meydana gelmektedir[39]. Geleneksel püskürtme işlemleri içerisinde en yüksek bağ dayanımı (>70 MPa) ve en düşük oksit içeriği (%1-5) HVOF' a aittir[40].

2.5.4.4 Patlamalı Püskürtme (D-Gun) Yöntemi

Patlamalı püskürtme (D-gun) yöntemi, bir seri patlamalarla ergimiş ve hızlandırılmış partiküllerin kaplanacak malzemeye yönlendirilmesiyle elde edilir. Bir kapsül içindeki toz karışımı ve oksit-asetilen gazı tutuşturulur. Tutuşmadan sonra bir patlama dalgası içine giren toz partiküller hızlanır ve yüksek sıcaklıklara ulaşır(Şekil 7). Her patlamadan sonra, kapsül içine azot püskürtülerek temizleme yapılır ve işlem saniyede birkaç kez tekrarlanır. Patlamalı püskürtmeyle elde edilen kaplamaların kalitesi oldukça yüksektir. Partikül hızları yüksek ve sonuçta oluşan kaplamalar yoğun ve yüksek bağlanma mukavemetine sahiptir. Yöntemin uygulanmasının kısmen pahalı olması en önemli kısıtlarından biridir. Ayrıca 140 desibel gibi yüksek gürültü oluşturması nedeniyle özel ses yalıtımı ve patlamaya dayanıklı hücreler gerektirmesi, yöntemin dezavantajları arasındadır[23].



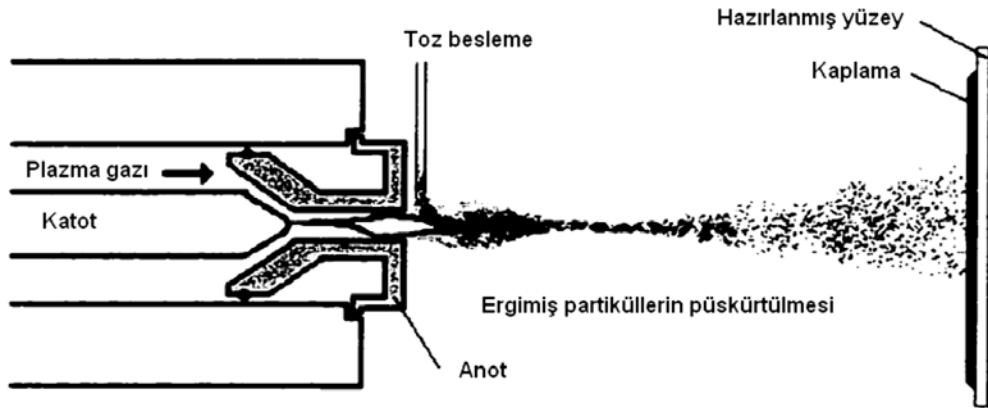
Şekil 7. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal spreyle kaplama[41].

Bu yöntemde patlamayla oluşan alev sıcaklığı ile toz partiküller yaklaşık $3000-3500^{\circ}\text{C}$ ısıtılır, esas malzemenin sıcaklığı ise CO_2 yardımıyla soğutmayla 150°C ' nin altında olup ergimiş damlaların hızı 800 m/s dolaylarında bulunur. Bu şekildeki yüksek hızlı damlalar, esas metal üzerinde boşluk seviyesi düşük (% 0.5-1) ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirir. Bu yöntemle tungsten karbür gibi refrakter malzemelerin çok yüksek yoğunluklu kaplamaları yapılabilir[42,43]. Patlamalı püskürtme yöntemi, sadece kaplanacak malzeme

yüzeyinde gördüğü belli bir alana işlem yapabilen bir yöntemdir. Her bir patlamada yaklaşık 2,5 cm çapında ve 2 µm kalınlığında daire şeklinde bir kaplama bölgesi oluşturulur. Kaplamalar bu nedenle, sıkı paketlenmiş mercimek tanelerine benzer bir yapıda yüzeye kuvvetli bir bağla bağlanmaktadır. Yeni tabancalarla geliştirilen kaplamalar (UCAR 2000 Serisi) aşınma direncini geliştirirken yorulma performansına etki etmemektedir. Bu sistemler yorulmaya karşı hassas olan uçak parçalarında kullanılmaktadır[23].

2.5.4.5 Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma püskürtme işlemi temel olarak alev püskürtme ile aynı olmakla beraber, püskürtme malzemesinin ergitmek için gerekli olan ısı enerjisinin elektrik ark yardımı ile üretildiği bir sistemdir. Tabanca ucunda meydana gelmiş elektrik arkına gönderilen gazların iyonize olması ile yüksek sıcaklık kaynağı olan plazma elde edilmektedir. Bu iyonize gazlar ile birlikte ergimiş partiküller yüksek hızla tabanca nozülünden altlığa doğru gönderilirler. Püskürtme tozunun ergiyip sıvı faza geçeceği en yüksek sıcaklık bölgesine besleme yapılmaktadır. Bazı zamanlarda hidrojen ve helyum ile argon ve nitrojen gibi inert gazlar, püskürtme malzemesinin hızını ve sıcaklığını kontrol etmek için kullanılırlar. Plazma püskürtme tabancası, tungsten (katot) ve bakır (anot)'ın bulunduğu iki elektrottan oluşturulmuştur. Tabanca içindeki kanallarda plazma kaplama işlemi boyunca soğutmayı sağlamak için su dolaşmaktadır(Şekil 8)[44].



Şekil 8. Plazma püskürtme işleminin şematik görünümü[45].

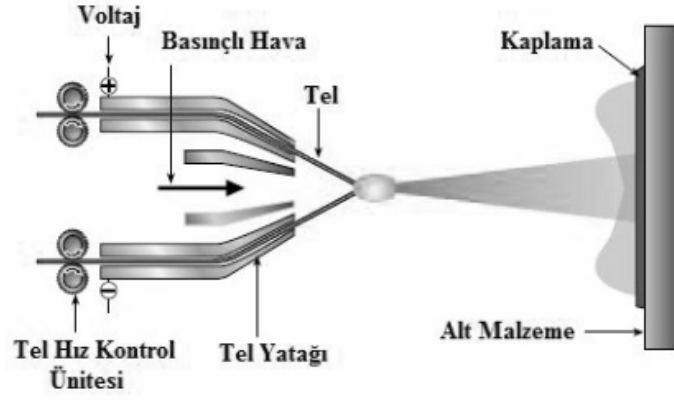
2.5.4.6 Elektrik Ark İle Püskürtme Yöntemi

Elektrik ark ile püskürtme işleminde, püskürtme tabancasındaki metalik malzemeler elektrik arkından yararlanılarak elde edilen ısı enerjisi yardımıyla eritilir. Elektrik arkının olmasında elektrotlar olarak eritilecek olan metalik iki tel kullanılmaktadır (Şekil 9). Elektrik ark ile püskürtmede 6000°C'nin üzerinde sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Sıkıştırılmış hava ergimiş metali atomize ederek kaplama malzemesinin yüzeyine doğru yönlendirir. Bu işlemde kısmen sünek ve elektriksel iletkenliğe sahip kaplama malzemeleri kullanılmaktadır[46]. Bu işlemde kullanılan elektrot teller, tel ile alev püskürtme işleminde kullanılan tellerle benzerdir. Elektrik arkı ile püskürtülmüş kaplamalar alevle püskürtülmüş kaplamalar ile kıyaslandığında çeşitli üstün özelliklere sahiptir[47].

Bunlar;

- Çökelme hızı daha yüksektir.
- Yüksek bağ mukavemetine sahiptir.
- Kaplamanın maliyeti daha düşüktür.
- Kaplamadaki oksit miktarı azaltılabilmektedir[36].

Elektrik ark püskürtme yönteminde iki tel elektrot arkı oluşturur ve yüksek ark sıcaklığında elektrotlarda ergime meydana gelir. Ergimiş partiküller atomize bir halde sıkıştırılmış hava ile hızlandırılarak kaplanacak malzemeye yönlendirilir. İşlemde bir soy gaz kullanılması durumunda oksidasyondan etkilenmeyen daha iyi kaplamaların elde edilmesi mümkündür. Teller sürekli olarak püskürtülen kaplama malzemesini dengede tutmaktadır. Kapanacak malzemeye herhangi bir alev tesiri olmadığından bu bölgede sıcaklık çok düşük olmaktadır. Aynı şartlarda yapılan diğer alev püskürtme yöntemlerine göre bağlanma çok daha iyi olmaktadır. Bu yöntemle karıştırılmış metallerin, paslanmaz çelik ve bakıra kaplanması mümkündür[23].



Şekil 9. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü[36].

Bu yöntem için temel uygulama çelik yapıların korunmasıdır. Örneğin bu yapılar atmosfer ve deniz korozyonundan etkilenen köprüler ve sahile yakın platformdaki çelik yapılardır. Yıllardır çinko temel kaplama olarak kullanılırdı. Fakat bileşiğin sülfür ve azot oksitlerin asidik sanayi atmosferleri ve kirliliğe karşı korunması gerektiğinde özellikle alüminyum artan oranda kullanılmaktadır. Ark spreyleme düşük karbonlu çelik, % 13 kromlu çelik ve alüminyum bronzları gibi malzemelerle, eskimiş miller, yataklar ve muyluları doldurmak için de kullanılır[40].

2.6 Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi

Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama, bir elektrolit içerisine daldırılan altlık malzemenin elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeyin kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır[29,30]. Güç kaynağına altlık malzeme anot olarak, tank ise katot olarak bağlanır. Altlık malzeme aynı zamanda katot görevi gören tank içerisindeki elektrolitik banyoya daldırılır ve voltaj uygulanır. Bu voltaj nedeniyle plazma etrafını elektrotlar çevreler ve oluşan oksijen iyonları altlığa geçerek bir film tabakası oluşturur. Çevre dostu bir kaplama yöntemi olan MAO, çok farklı mekanik ve fiziksel yapıya sahip kaplamaların özellikle Mg, Ti, Al gibi malzemeler ve alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına imkân tanımaktadır.

Kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing), mikro plazma anodik oksidasyon (microplasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (mikro plazma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrolytic oxidation) ve elektroz plazma oksidasyon

(elektroplasma oxidation) olarak da bilinen mikro ark oksidasyon yöntemi, bir çeşit elektrokimyasal işlem olup plazmanın altlık malzeme üzerine mikro arklama ile oluşturulmasıdır.

Elektroliz sırasında oluşan bu elektriksel deşarj olayı yaklaşık yüz yıl önce Sluginov tarafından keşfedilmiş olmasına ve detaylı olarak 1930'lu yıllarda Günterschultze ve Betz tarafından çalışılmış olmasına rağmen pratik olarak faydalanılmaya 1960'lı yıllarda başlanmıştır[69].

Anodik oksitlenme prensibine dayanan Mikroark Oksidasyon tekniği yeni bir yüzey kaplama işlemi olarak son 10 yıl içerisinde çok yaygın bir şekilde araştırma ve uygulama alanı bulmuştur[29,30,48]. Öncelikle işlem, kompozisyonu kaplama oranınca son derece kritik olan ve anot film oluşturma özelliğine sahip alkali elektrotları çalıştırır. Elektrotların pH dereceleri 8-12 arasında ve çevresel nitelikte kusursuzdur. Geleneksel anotlama işleminde ise pH derecesi düşük asit elektrotları çalıştırılmaktadır[49].

Yöntem, ortalama voltaj ve akımdaki doğru akımları çalıştırır. Oluşan voltaj nedeniyle, mikro plazma etrafı elektrotlar tarafından çevrilir ve plazmada oluşan oksijen iyonları anodik filmde altlığa difüze olur ve orada daha kalın film oluşturur. Oluşan voltaj ve akım, geleneksel işlemlerle uzun zaman diliminde oluşan benzer kalınlıktaki filmlerin oluşumunu çok kısa bir sürede sağlar. Voltajlar oluşan filmin kırılma voltajından daha yüksek olduğundan işlemi güçlendiren açık kanallara ihtiyaç yoktur ve bu nedenle daha kalın ve yoğun, gözeneksiz film tabakası oluşmaktadır. İlave, doğru akımın kullanılması ile üretim artmıştır[49].

Elektrik akımından sağlanan güç, elektrokimyasal tanklarda uygun kontroller ile kullanılmakta, bu da yöntemi daha az miktarda sermaye gerektiren hale sokmaktadır. Güç rektifiyesine gerek yoktur[4]. Elektrolitik banyo derecesinin korunması için ekstra büyük çabalara ihtiyaç kesinlikle yoktur. Hatta eğer solüsyon sıcaklığı 40-70°C arasında ise son derece başarılı kaplamalar elde edilir. Ayrıca bu sıcaklık aralığında işlem kolaylaşır[50].

Değişik tür kaplamalar için elektrolitik kompozisyonun kendisi oldukça kararsızdır. Kaplamanın yüksek yoğunluğu nedeniyle anotlanmış parçanın boyutunda hiçbir değişim mevcut değildir ve tamamıyla bitirilmiş parça daha sonraki aşamalara (postprocessing finishing şeklinde adlandırdığımız işlemlere) gerek kalmadan kaplanabilir. Her ne kadar yumuşak dış kaplamanın %15'i üretim sırasında yüzeyden sıyrılrsa da, iç tabakanın kalın seramik tabaka olduğu gözlenir[49].

MAO yönteminin en önemli avantajlarından birisi, karmaşık yüzey geometrisine sahip parçaların tüm yüzeylerinin aynı kalınlık ve özelliklere sahip sert, aşınma ve korozyona karşı dirençli tabaka ile kaplanmasına imkân tanınmasıdır. Bu sayede yüzeyin sadece belli bir kısmını hedef göstererek kaplama yapan tekniklere üstünlük sağlar[29-30].

2.6.1 MAO Yönteminin Kullanım Alanları

Mikro ark oksidasyon işlemi otomotiv endüstrisi, uzay endüstrisi, askeri alanda vs. gösterdiği avantajlardan dolayı pek çok uygulama alanı bulabilmektedir. Mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilen kaplamalar kalın seramik kaplama istenen uygulamalarda kullanılabilirler. Mikro ark oksidasyon işlemi geleneksel anodik oksidasyon işlemleri ile kaplanamayan yüksek silisyum içeren alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımlarının kaplanmasında kullanılabilirler. Mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilen seramik kaplamalar boyalara karşı gösterdiği kuvvetli eğilim ile mükemmel bir boya tabanı görevi görebilirler. Mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilmiş kaplamalar yüksek sıcaklık dayanımları ile uzay araçlarında ve roketlerde koruyucu olarak kullanılabilirler ki, bu tür kaplamaların mükemmel dielektrik özelliğinden faydalanarak yalıtkan ortamlarda kullanılması da mümkündür. Bunlara ek olarak mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilen kaplamaların değişik renkleri de, bu yöntemle üretilen malzemelerin, mimari uygulamalarda kullanılabileceğini gösterir[51].

2.6.2 MAO Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Mikro ark oksidasyon teknolojisi henüz gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan, malzeme yüzeyinde gelişen seramik filmin oluşum ve gelişim mekanizması ile oluşan seramik filmin özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için pek çok çalışmanın yapılması gerekmektedir. Fakat bugüne kadar yapılan çalışmalar baz alındığında mikro ark oksidasyon teknolojisinin pek çok avantajı olduğu yalnız bunun yanında bazı dezavantajları da beraberinde getirdiği gözlenmiştir. Mikro ark oksidasyon teknolojisinde işlem öncesi numune hazırlama işlemi diğer teknolojilere göre daha az önem arz eder. Bu durum üretim sürecinin daha hızlı işlenmesini ve işlem öncesi numune hazırlamada kullanılacak çözeltilerin çevresel etkilerinin en aza indirilmesini sağlar. Mikro ark oksidasyon teknolojisinin diğer bir avantajı ise alüminyum, magnezyum, titanyum, niyobyum, zirkonyum gibi geniş bir malzeme ağına

uygulanabilmesi ve geleneksel anodizasyon yöntemi ile kaplanması zor olan yüksek bakır içeren alüminyum alaşımlarının, yüksek silisyum içeren döküm malzemelerin bu yöntem ile kaplanabilmesidir. Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan çözelti çevreye zarar vermeyen, korozyon olmayan, hazırlanması kolay ve ucuz bir karışımdır. Diğer geleneksel anodik oksidasyon işlemlerinde görülen yanma olayı mikro ark oksidasyonda görülmez. Ayrıca mikro ark oksidasyon işlemi sonrası malzemede diğer geleneksel anodik oksidasyon işlemlerinde görülen kırılma dayanımındaki düşüş görülmez. Bu avantajları mikro ark oksidasyonun diğer geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine göre tercih edilir olmasını sağlamaktadır. Mikro ark oksidasyon işleminde de diğer işlemlerde olduğu gibi bazı sınırlamalar ve olumsuzluklar mevcuttur. Mikro ark oksidasyon işlemi seçilen parametrelere bağlı olarak 1000 Volt değerine kadar (ve yaklaşık kapasite olarak 1 MW) enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bu yüksek enerji parça türü ve boyutuna bağlı olarak tehlikeli bir üretim süreci oluşturur. Kullanılan enerji miktarı göz önüne alındığında mikro ark oksidasyon işleminde üretim maliyetinin geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine göre fazla olduğu göze çarpar. Ayrıca malzeme yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile de işleminde kullanılan çözeltinin soğutulması için yüksek kapasiteli bir soğutucuya ihtiyaç duyulacaktır. İşlem sonucu oluşan seramik kaplama pürüzlü ve oldukça kırılmandır; bu nedenle en dış yüzeyde aşınma direnci oldukça düşüktür. Seramik kaplamanın iç katmanları ise tam tersi bir özellik gösterir. Bu katmanlar oldukça sert ve aşınma dayanımı yüksek bölgelerdir. Fakat malzeme yüzeyinde oluşan bu seramik kaplamanın üst katmanının kaldırılması hem maliyet açısından hem de üretim açısından verimli değildir. Mikro ark oksidasyonun pek çok avantajının yanında yukarıda belirtilen dezavantajları, bu teknolojinin kullanım alanlarını kısıtlamaktadır[51].

2.6.3 MAO Kaplama Ünitesi

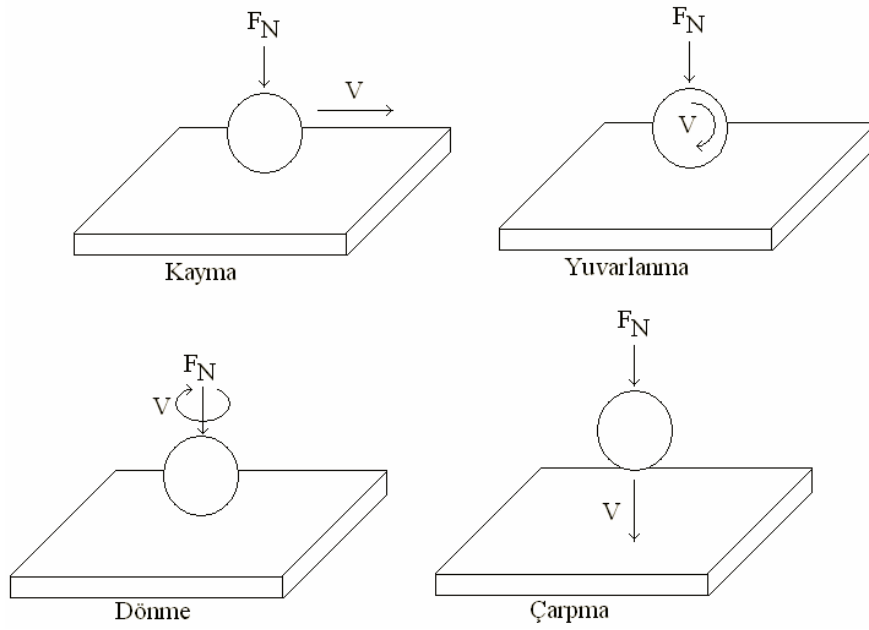
Mikro ark oksidasyon işlemi en basit haliyle bir elektrik güç kaynağı, bir elektrolit havuzu, anot, katot ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. Mikro ark oksidasyon işlemi elektrolit çözelti içerisine daldırılmış anot numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj verilmesi ile anot üzerinde ark oluşturulması ve numunenin yüzeyinin oksit kaplanması olarak tanımlanabilir[52].

Elektrolitler tipik olarak karboksilik asit, vanadat, permanganat, polimer ve dispersant, vb. katışıkları içeren silikat, alüminat, metafosfat, borat ve hidroksitleri içerirler. Paslanmaz

elik, sayaç elektrot gibi dönme olayının gerçekleştiği tankın imalinde kullanılmıştır. Elektrotun sıcaklığı genellikle 10–60°C aralığında kontrol edilir. Mikro ark oksidasyon proseslerinde kullanılan elektrik gücü büyük miktarda ısı oluşturduğundan dolayı sıcaklık aralığını korumak için yüksek bir soğutma kapasitesi gereklidir. Anot numune üzerine negatif voltaj verilmesi ile malzeme yüzeyinde oksit filmi oluşumu başlamaktadır. Uygulanan voltaj belli bir kritik değere geldiğinde malzeme yüzeyinde mikro boyutlarda arklar oluşmaya başlar. Malzeme yüzeyinde bu mikro boyuttaki arkların oluştuğu voltaj değerine “bozunum voltajı (*dielectric breakdown*)” denmektedir. Bu kritik değere gelindiğine malzeme yüzeyinde metal iyonları ile hidroksit iyonları zıt yönlere hareket ederek oksit oluşumunu tekrar başlatırlar[53]. Malzeme yüzeyinde ark oluşumu için kritik potansiyel esasen elektrotun kutupsallığına, elektrotun malzemesi ve içerisinde bulunduğu elektrolitin içeriğine bağlıdır ancak sıcaklık, elektrolit konsantrasyonu ve yüzey geriliminden etkilenmez. Teorik analizler kıvılcım noktalarındaki yerel geçici sıcaklıkların, neredeyse güneşin merkezindeki sıcaklığa yaklaşarak birkaç bin Kelvin’e ulaşabildiğini belirtmektedir. Bu teknoloji alüminyum, çinko, titanyum alaşımları, bunun yanında magnezyum alaşımları gibi toprak alkali metalleri ile valf metalleri üzerine seramik kaplamalar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Oluşan kaplamaların mikro sertlik, korozyon ve aşınma direnci performansı geleneksel anodizasyon prosesleri ile oluşanlar ile karşılaştırılabilir[51].

2.7 Sürtünme ve Mekanizmaları

En genel manada sürtünme, temasta olan ve birbirine göre bağlı hareket yapan elemanlar arasında harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanır. Sürtünmenin sayısal değeri bazı durumlarda hesaba katılmayacak kadar küçük olsa dahi pratik olarak daima mevcuttur. Sürtünme direncini oluşturan parametreler oldukça fazladır ve bunların etkileri büyük farklılıklar göstermektedir. Bağlı hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, aralarında üçüncü maddenin bulunup bulunmadığı ve ortam şartları gibi parametreler olayı daha karmaşık bir hale getirmektedir. Sürtünme hareketin cinsine göre, kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, dönme veya çarpma şeklinde olmaktadır(şekil 10)[54].



Şekil 10. Tribolojik sistemlerin kinematikleri[55]

Sürtünme kavramı birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı (sınır sürtünmesi) ve sıvı sürtünme (film sürtünmesi) olarak üç halde incelenebilir[54].

2.7.1 Kuru Sürtünme

Genel olarak yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir. Gerçek anlamda kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış, yüzeylerin, mutlak basınçta birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelmektedir. Mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumlarında, yüzeyler çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi, sürtünme sonucunda sıcaklığı yükselen yüzeylerde çok ince oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oluşum, yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir[56].

2.7.2 Sınır (Yarı Sıvı) Sürtünme

Sürtünen yüzeylerin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan maddelerin girmesi veya gönderilmesi durumunda yüzeyler artık kuru olmayacaktır. Bu durumda sürtünme yağlanmış

yüzeyler arasında meydana gelecektir. Yağlanmış yüzeyler arasında sınır sürtünmesi ve film sürtünmesi şeklinde tanımlanan sürtünme mekanizmaları oluşmaktadır. Teorik olarak kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasındaki sürtünme durumu sınır sürtünmesi olarak tanımlanır. Birbiri ile temasta olan iki metal yüzeyi arasına belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü bir madde (yağlayıcı) koyulup, mevcut yük ve kayma hızı koşullarında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, sürtünme direncinin üç temel bileşeni olacaktır. Bu bileşenler, adhezif bileşen, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direncidir[54].

Yüzeylerin iyi işlenmesiyle deformasyon direnci, kayma hızının artırılması ve yağlayıcı maddelere değişik türlerde katkı maddelerinin ilave edilmesiyle de adhezyon direnci büyük bir azalma gösterecektir. Böylece hem sürtünme direnci hem de aşınma miktarı azalır[54].

Sınır ve kuru sürtünme durumlarında, sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi, tutma-bırakma denilen olayı meydana getirirler. Aşınmış debriyaj ve fren balatalarında, özellikle küçük kayma hızı bölgelerinde bu olay sonucunda meydana gelen sarsıntı ve ses, yine ıslak parmak ucunun bir cam bardak kenarına sürtünmesi sonucunda çıkan yüksek frekanstaki ses titreşimleri tutma-bırakma olayının sonucudur. Pratikte tutma-bırakma titreşimleri, küçük kayma hızları bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu olayı engellemek için sistemin yaylanma rijitliğini arttırmak veya sürtünme katsayısının, kayma hızı ile değişim eğilimini azaltmak en uygun çözümlerdir[54].

2.7.3 Film (Sıvı) Sürtünme

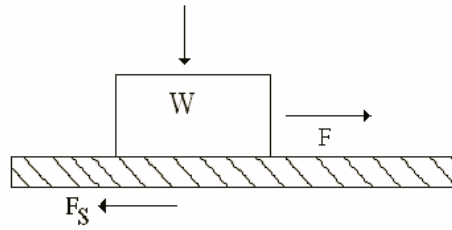
Yüzeyler arasında bir yağlayıcının bulunması halinde sürtünme direncinin azaldığı deneysel olarak bilinmektedir. En ideal tribolojik ortam, iç sürtünme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkar. Bu durumda bağıl hareket yapan yüzeyler arasında oluşabilecek adhezif ve deformasyon dirençleri ortadan kalkar. Uygun ara tabaka yani yağlayıcı seçimi ile kontrol altında tutulabilecek bir sürtünme ve aşınma durumu elde edilir[54].

2.8 Sürtünme Teorileri ve Sürtünme Katsayısı

Sürtünme olayı basitmiş gibi görünse de, aslında oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları açıklamak için birçok teori ileri sürülmüştür. Yapılan araştırmaların sonuçlarında, üretilen enerjinin faydalı işe dönüşmesi sırasında, enerjinin büyük bir kısmı sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıpları yenmek için harcanmaktadır. Sürtünmenin, faydalı iş

enerjisinin büyük bir kısmını yok etmesine rağmen, günlük yaşantımızda sürtünme olmaz ise birçok işin gerçekleştirilemeyeceği de bir gerçektir. Bir taşıtın hareket ettirilmesi, yavaşlatılması ve durdurulmasında tamamen sürtünme prensiplerinden yararlanılmaktadır[55,57].

Sürtünme ile ilgili tarihsel gelişime bakıldığında, iki temel teori ön plana çıkmaktadır. Birincisi Fransız bilim adamı Amontons tarafından ortaya koyulmuştur. Amontons' a göre sürtünme kuvveti, cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Yani bir cisim diğeri üzerinde kayarken normal yük iki katına çıkarılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Coulomb tarafından açıklanan diğeri teoriye göre, sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir. Ayrıca Coulomb' a göre bir cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvet, hareketi devam ettirmek için gerekli olan kuvvetten daha büyüktür ve Coulomb bu olayı statik ve kinetik sürtünme katsayısı ile tarif etmiştir[56].



Şekil 11. Sürtünme olayı ve sürtünme kuvveti[54]

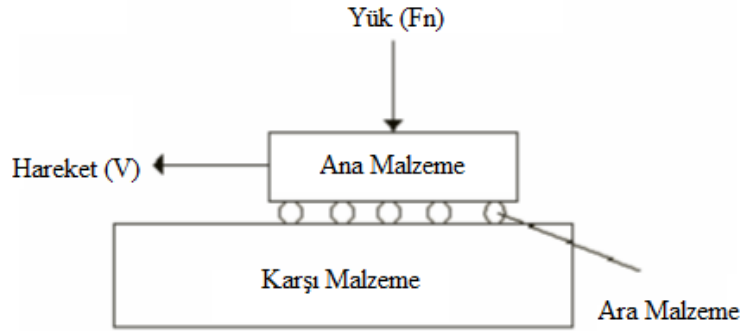
Şekil 11'de W ağırlığındaki bir cismin düz ve yatay bir düzlem üzerinde hareketsiz durduğu varsayılabilir. Bu cisme küçük bir F kuvveti uygulandığında kayma olmadığı görülür, yani cisim sabit kalır. Bu durum Newton' un etki-tepki prensibine göre temas bölgesinde oluşan statik sürtünmenin, cisme uygulanan F kuvvetine eşit ve ters yönde olduğunu açıklar.

$$F = F_s \quad (1)$$

Buna göre bağıl hareket eden ve normal bir kuvvetin etkisi altında bulunan iki cismin temas eden yüzeyleri arasında harekete karşı bir F_s sürtünme kuvveti oluşur.

$$F_s = \mu \times W \quad (2)$$

sıvı ve gaz halinde olabildiği gibi, aşınma sırasında malzemelerden kopan parçacıklarda ara malzeme olacak şekilde aktif olarak aşınma olayına katılabilirler. Şekil 13'te aşınma olayını meydana getiren unsurlar gösterilmektedir[57-59].



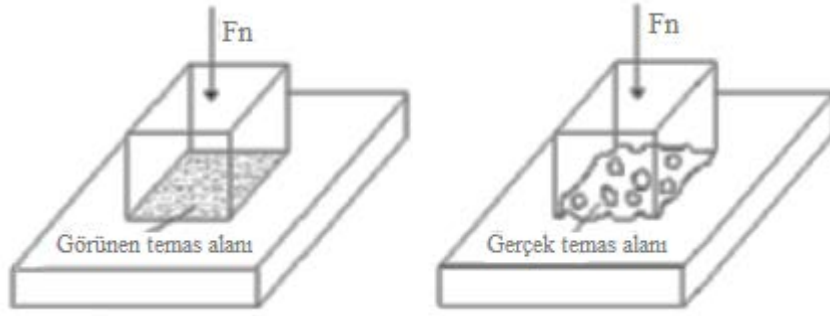
Şekil 13. Aşınma olayını meydana getiren unsurlar[59]

2.9.1 Aşınma Türleri

Aşınma olayını meydana getiren unsurların farklı durumlarına göre bunların değişik kombinasyonları, değişik aşınma tiplerinin ortaya çıkmasına neden olur. Aşınma, malzemelerin cinsi, yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, malzemenin işlenme şekli ve sertlik gibi parametrelerin değiştirilmesinden etkilenmektedir[60].

2.9.1.1 Adhesif Aşınma

Temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan kuru kayma yüzeylerinde daima mevcut olan bir aşınma türüdür. Kayma aşınması da denilmektedir. Aşınma, kayma ara yüzeylerinde metal-metal temas noktalarının soğuk kaynak oluşturması nedeniyle oluşur. Kaynak olmuş temas noktası tamamen veya kısmen parçalandığında malzeme aşınma ürünü haline gelir ve kopan parçacıklar serbestçe düşebilir veya yüzeyler arasında kalarak abrasif aşınmaya neden olabilirler. Bu oluşumda yüzeylerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileşimleri önemli ölçüde rol oynamaktadır. Kayma halinde yüksek basınçlara ilaveten, temas noktalarında ayrıca aşırı sıcaklık artışlarının da olması, kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Oluşan bağ, malzeme yüzeyleri ne kadar temiz ise, o oranda kuvvetli olmaktadır. Rutubet, absorbe gazlar ve yağlayıcı maddelerin varlığı bağ kuvvetini ve dolayısıyla aşınmayı azaltır[55,57].



Şekil 14. Görünen ve gerçek temas alanları

Şekil 14'te şematik olarak gösterildiği gibi malzemenin temas eden yüzeyleri ne kadar hassas işlenirse işlensin yüzeyde mikroskobik girinti ve çıkıntıların olduğu bir gerçektir. Bu bakımdan temas halinde olan iki yüzey bu çıkıntılar vasıtasıyla temas eder. Bu çıkıntıların arasındaki girintiler ise temas alanının dışında kalır[59].

2.9.1.2 Alışma Aşınması

Genellikle katı yağlayıcılarla yağlanan sürtünme yüzeylerinde, örnek olarak dişli çarkların yatakların ve kızakların alışma çalışması dönemlerinde görülen genellikle yüzey pürüzlülüklerinin düzelmesine yol açtığı için arzulanan ve kontrol altında tutulabilen bir aşınma şeklidir. Şekil 15'te alışma aşınmasının oluşabileceği tribolojik sistemler görülmektedir[54].



Şekil 15. Alışma aşınmasının oluştuğu tribolojik sistemler[59]

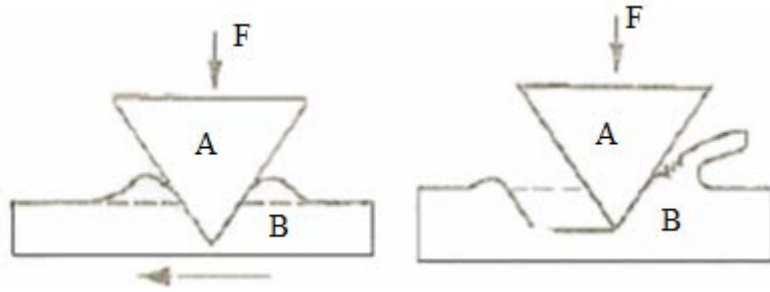
2.9.1.3 Yenme Tipi Aşınma

Yenme aşınması ani olarak kendini gösteren bir olaydır. Birbiri üzerinde kayan etki yüzeylerindeki basınç ve kayma hızı belirli bir kritik değeri aştığında ve ortam sıcaklığının

çok yüksek olması halinde yüzeylerde çok kuvvetli bir aşınma meydana gelmektedir. Genellikle roket kızaklarında ve top namlularında görülen bir aşınma türüdür[55].

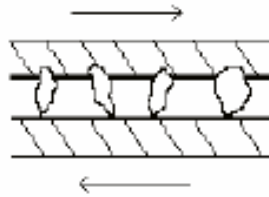
2.9.1.4 Abrasif Aşınma

Sürtünen sert yüzeylerin daha yumuşak malzemeleri kesmesi şeklinde meydana gelen aşınma türüdür. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girerler ya da adhesif aşınma ürünleri olarak sistemin içinde meydana gelirler. Sert yüzey pürüzleri kesici takım gibi işlev görerek daha yumuşak malzemelerden malzeme koparır. Aşınmadan dolayı kopan parçacıklar yabancı maddeler gibi davranır ve aktif olarak olaya karışır.

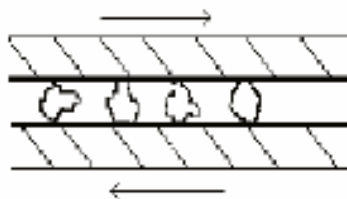


Şekil 16. Abrasif aşınma mekanizması[1]

Abrasif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler, sertlik, aşındırıcı, tane veya pürüzün boyutu ve şekli, uygulanan normal yük ve kayma hızı olarak sayılabilir. Şekil 16'te abrasif aşınma mekanizması gösterilmektedir[55]. Sürtünen yüzey çiftlerinden sert ve pürüzlü olanının veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert bir partikülün diğer yüzeyi kazıması iki elemanlı abrasyon olarak adlandırılır(Şekil 16).



Şekil 17. İki elemanlı abrasyon



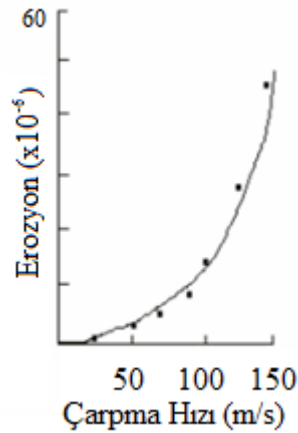
Şekil 18. Üç elemanlı abrasyon

Abrasif aşınma dayanımı sertlikle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple abrasif aşınma dayanımını artırmanın en etkili ve ekonomik yolu, uygun yüzey sertleştirme tekniklerinin kullanılmasıdır[61].

2.9.1.5 Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, abrasif aşınmayla birçok yönden benzerlikler göstermektedir. Eroziyon aşınmanın abrasif aşınmadan temel farkı, aşınmanın, sert partiküllerin yüzeyi kazınmasından ziyade yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır. Buna örnek olarak gaz türbinlerinin nozul ve kanatçıklarının yanma ürünleri içerisindeki katı parçacıklar tarafından aşındırılması verilebilir[55]. Sert partiküllerin bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma, abrasif erozyon olarak adlandırılır. Sert partiküllerin bağıl hareketleri yüzeye dik olduğunda aşınma, çarpma erozyonu olarak adlandırılır[62].

Eroziyon aşınmayı etkileyen temel faktörler, aşındırıcı partikülün özellikleri (aşındırıcı boyutu, şekli, sertliği), aşınmaya maruz kalan elemanın özellikleri (elemanın sertliği ve yüzey kalitesi) ve ortamın özellikleri (partikülün çarpma veya yalama hızı, çarpma açısı ve birim zamanda çarpan partikül miktarı) olarak üç ana grup altında incelenebilir. Şekil 19’ da çarpma hızının erozyon aşınmasına olan etkisi görülmektedir[55].



Şekil 19. Aşındırıcı çarpma hızının erozyona etkisi[63]

2.9.1.6 Pulcuk Kalkması (Pitting)

Bu tip aşınma daha çok yuvarlanma sürtünmesine maruz, çizgisel veya noktasal temas halindeki çok küçük temas alanlarına sahip olan yüzey çiftlerinde meydana gelmektedir.

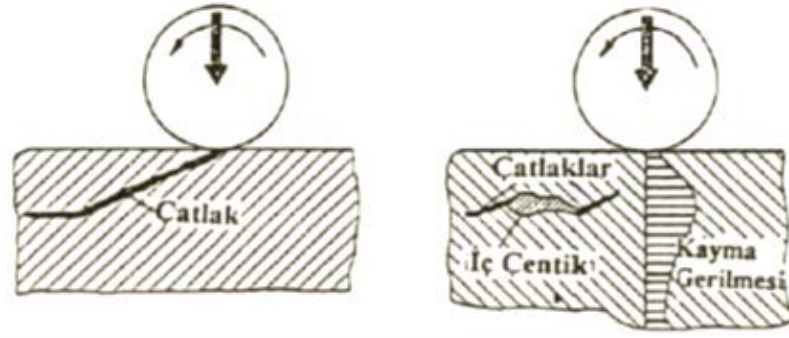
Genel görünüşü yüzeylerden küçük pulcuk ve parçacıkların kalkarak çukurcukların meydana gelmesi şeklindedir. Pulcuk kalkması sert çeliklerde yumuşak çeliklere nazaran daha sık görülmektedir. Rulmanlı yataklarda ve dişli çarklarda görülebilen bir aşınma türüdür[55].

2.9.1.7 Korozi Aşınma

Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ve özellikle metallerde etkili olan bir aşınma türüdür. Korozyon diğer aşınma mekanizmalarından farklı olarak, kimyasal korozyon, elektrokimyasal korozyon ve sürtünme oksidasyonu gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Korozi aşınma genellikle aşınmanın hafif bir şeklidir, fakat yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortam içerisinde aşırı bir hal alabilir[55,57] Malzemelerin yüksek sıcaklık ve gaz ortam içerisinde oksitlenmesi kimyasal korozyon, çözelti ortamlarında meydana gelen oksitlenme ise elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılır. Demir esaslı malzemelerde daha çok gözlenen korozyon ise oksidasyondur. Sürtünme oksidasyonu mekanik aşınma ile korozi aşınmanın bir bileşimini teşkil etmektedir. Sürtünme oksidasyonu, aralarında çok küçük bağlı hareket olan ve oksitlenmeye elverişli bütün malzeme türlerinde meydana gelebilmektedir. Özellikle ambalajlanmış bir şekilde uzun süre bekleyen makinelerin rulmanlı yataklarında ve mil-göbek gibi geçme olan yerlerinde, nakliyat sırasında meydana gelecek küçük sarsıntı ve titreşimler sürtünme oksidasyonunun oluşmasına neden olabilirler[55].

2.9.1.8 Yorulma Aşınması

Değişik yüklemeler etkisi altında meydana gelen bir aşınma türüdür. Böyle bir aşınma çok sayıda yükleme periyodundan sonra meydana gelmektedir. Yüzey bölgesi, titreşimli değişken zorlanmaya maruz kaldığı zaman malzeme yüzeyinin hemen altında mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yüzeye oluşması sonucunda pulcuk kalkması meydana gelir ve yüzeyden büyük parçacıklar koparak çukur ve oyukların oluşmasına neden olur. Genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde görülmektedir. Şekil 20’de yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi yorulmasının meydana görülmektedir[57,59].

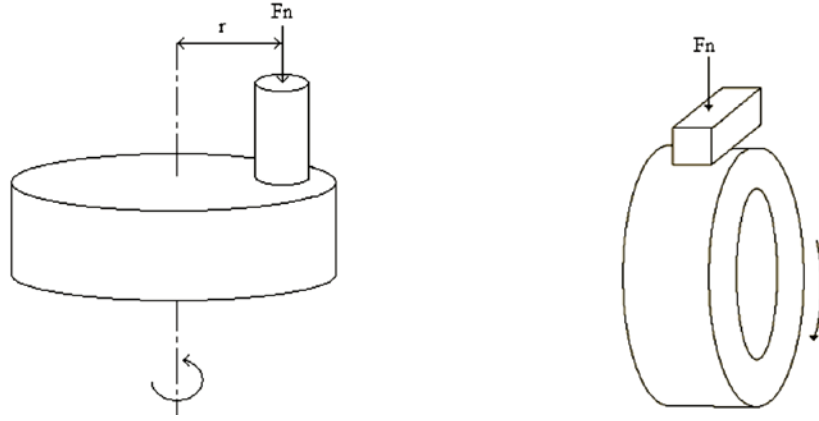


Şekil 20. Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi[59]

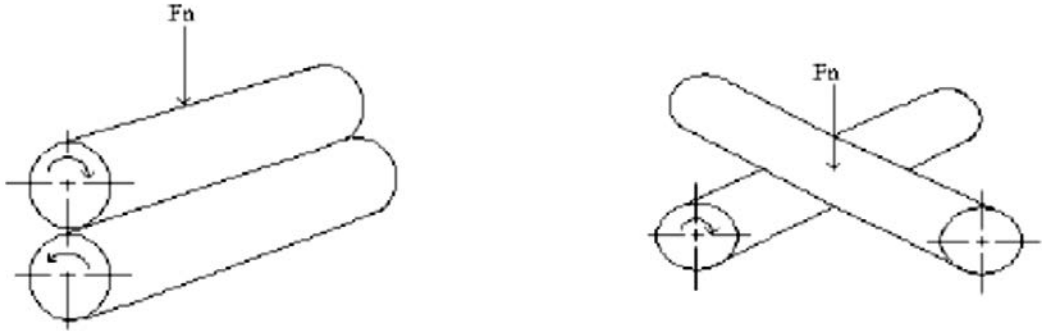
2.10 Aşınma Deney Yöntemleri

Sistem veya sistem elemanlarının sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenebilmesi için yapılan testler, tasarım açısından oldukça önemlidir. Sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, gerçek makineler veya model deney düzenekleri kullanılarak yapılmaktadır. Doğrudan makine üzerinde ve gerçek şartlarda yapılan deneyler hem oldukça pahalıdır, hem de karmaşık tribolojik etkiler nedeniyle değerlendirilmeleri zordur. Bu sorunları ortadan kaldırmak için birçok model deney yöntemleri geliştirilmiştir[64]. Sürtünme direnci ve aşınma dayanımının ölçülmesinde kullanılan model deney yöntemlerinin sayısının fazla olmasının sebebi, sürtünme ve aşınma mekanizmalarının ve tribolojik sistemlerin fazla olmasındandır. Bu sebeple günümüzde sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı uluslararası standartlarla belirlenmiş test teknikleri ve parametreleri kullanılarak yapılmaktadır.

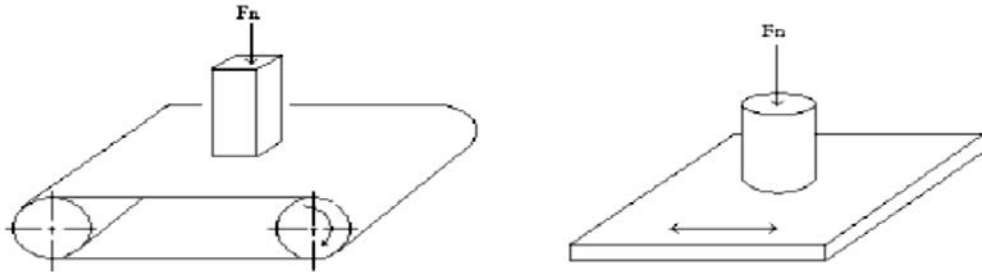
Sürtünme ve aşınma testleri genellikle aynı sistemler üzerinde yapılmaktadır. Buradaki en önemli parametre ölçüm yöntemlerindeki farklılıklardır. Yine test süresi de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünme testleri çoğunlukla kısa sürerken, aşınma testleri bazen çok uzun süreler alabilmektedir. Sürtünme ve aşınma testleri için geliştirilen model deney sistemlerinin temel prensipleri Şekil 21-24’de görülmektedir[55].



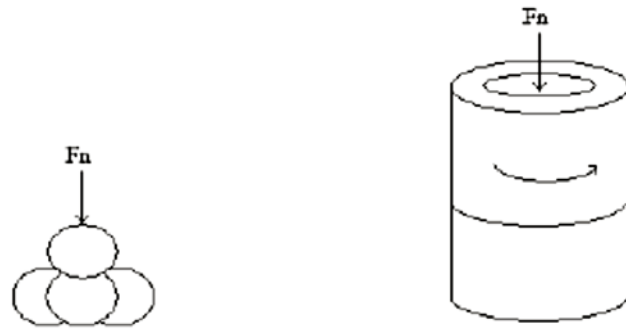
Şekil 21. Sürtünme ve aşınma model deney sistemleri (Pim-Disk ve Blok-Halka)[55,64]



Şekil 22. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Silindir-Silindir ve Çapraz Silindir)[55,64]



Şekil 23. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Levha-Kayış ve Pim-Levha)[55,64]



Şekil 24. Sürtünme ve Aşınma Model Deney Sistemleri (Dört Bilya ve Siebel Kehl)[55,64]

2.11 Aşınma Ölçüm Metotları

2.11.1 Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan ölçüm metodudur. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} veya 10^{-5} gr hassasiyetinde oldukça duyarlı terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilmiş ise, alınan yol metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alanı için hesap edilecekse (gr/cm^2) gibi bir birim ile ifade olunabilir. Ağırlık farkı ölçme yönteminde en çok kullanılan bağıntı aşağıdaki gibidir[54].

$$W_a = \frac{G}{d.M.S} \quad (3)$$

Wa: Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

G : Ağırlık kaybı (gr)

M : Yükleme ağırlığı (N)

S : Aşınma yolu (m)

d : Malzeme yoğunluğu (gr/cm^3)

olarak ifade edilir[54].

2.11.2 Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında meydana gelecek boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması sureti ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile $1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülebilir. Boyutsal değişimin ölçülmesinde sistemin durdurulması gerekmez. Bunun için mekanik (mikrometre), optik (mikroskop), elektronik (lineer deplasman ölçer) yöntemlerde kullanılabilir[54].

2.11.3 İz Değişim Metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyon ile oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür. Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Bilya veya elmas pramitin bıraktığı iz çapındaki değişme mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle değişim incelenir[54].

2.11.4 Radyoizotop Ölçüm Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü atom parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir[54].

2.11.5 Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu

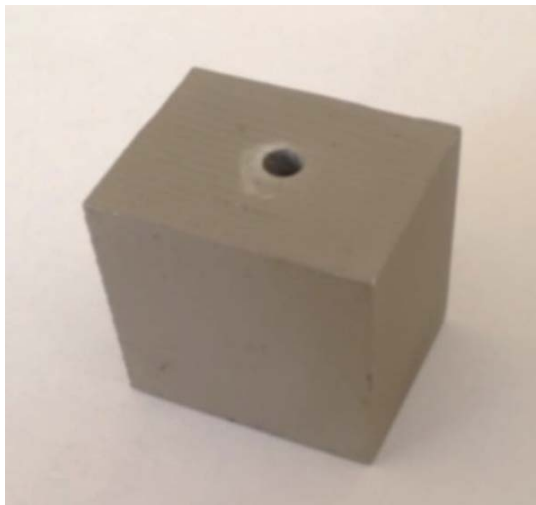
Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değişkenlerine ait veriler, esas itibarı ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen uygun sensörler vasıtası ile belirlenmektedir. Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktarılarak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır[65].

3 MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada 7075-T651 alüminyum alaşımı altlık malzeme olarak kullanılarak farklı voltaj, frekans ve sürelerde mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülükleri ve kaplama yapıları incelenerek SEM görüntüleri elde edilmiş ve elde edilen verilerin doğrultusunda sonuçlar irdelenmiştir.

3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Sey-Koç Alüminyum (İstanbul) firmasından 20 mm kalınlığında levha halinde temin edilen T651 standardında ısıtıl işlem görmüş Al7075 malzeme, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği atölyesinde 25,4 x 25,4 mm boyutlarında kesilmiştir. Boyut olarak hazır hale gelen numunelerin üzerine MAO kaplama esnasında içinden anodik telin bağlanabilmesi ve malzemenin kaplama solüsyonunda askıda tutabilmesi amacıyla 3,5 mm çapında delikler açılmıştır(Şekil 25). Daha sonra numuneler 400 – 800 – 1200 lük SiC zımparalar vasıtasıyla parlatma makinasında (Şekil 26) parlatılarak yüzey pürüzlülükleri yaklaşık olarak $Ra = 0,1 \mu m$ değerine getirilmiştir. Bu işlemten sonra üzerindeki yağ vb. kalıntılardan arındırılmak amacıyla etil alkolle temizlenen numuneler üzerine sıcak hava tutularak kurutulmuştur. Ardından %40'lık nitrik asit çözeltisinde dağlanan numuneler sıcak havaya tekrardan maruz bırakılarak kurutulmuş ve mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanmaya hazır hale getirilmiştir.



Şekil 25. Kaplanmaya hazır numune



Şekil 26. Parlatma cihazı

3.2 Deneylerin Yapılışı

Deneyisel çalışma iki kısımdan meydana gelmektedir. Birinci kısım numunelerin hazırlanması ve kaplanması, ikinci kısım ise kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü, kaplama kalınlığı ve aşınma davranışının incelenmesidir. Bütün bu işlemler için bir çalışma programı hazırlanmış ve bu program çerçevesinde deneyisel çalışma yürütülmüştür(Şekil 27).

Numunelerin kaplanma işlemleri, Ti tozu ilavesiz ve Ti tozu ilaveli solüsyon kullanılmak suretiyle iki şekilde yapılmıştır. Ti ilave edilen solüsyon ise Na_3PO_4 (Sodyumfosfat), KOH (Potasyumhidroksit) ve NaAlO_2 (Sodyumalüminat)' tan meydana gelmiştir.

Deneylerde kullanılan Ti tozunun boyutu yaklaşık 170 nm'dir. Kaplama işleminde 450, 500 ve 550 V voltaj, 100 ve 350 Hz frekans değerleri kullanılmış ve numuneler solüsyon içerisinde 10, 20 ve 30 dakika işlem süresinde bekletilerek kaplama işlemi tamamlanmıştır. İlave edilen Ti tozu Van-Kim firmasından tedarik edilmiş olup solüsyona katılma oranı 0,8 gr/lt'dir. Deneyisel çalışmada kullanılan deney parametreleri Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 27. Deney programı

Tablo 7. Deney Parametreleri (Ti ilavesiz)

Numune Kodu	Kaplama Süresi (dk)	Frekans (Hz)	Voltaj (Volt)	Negatif Voltaj (Volt)
K1	10	100	450	100
K2	10	100	500	100
K3	10	100	550	100
K4	10	350	450	100
K5	10	350	500	100
K6	10	350	550	100
K7	20	100	450	100
K8	20	100	500	100
K9	20	100	550	100
K10	20	350	450	100
K11	20	350	500	100
K12	20	350	550	100
K13	30	100	450	100
K14	30	100	500	100
K15	30	100	550	100
K16	30	350	450	100
K17	30	350	500	100
K18	30	350	550	100

Tablo 8. Deney Parametreleri (Ti ilaveli)

Numune Kodu	Kaplama Süresi (dk)	Frekans (Hz)	Voltaaj (V)	Negatif Voltaaj (Volt)
K19	10	100	450	100
K20	10	100	500	100
K21	10	100	550	100
K22	10	350	450	100
K23	10	350	500	100
K24	10	350	550	100
K25	20	100	450	100
K26	20	100	500	100
K27	20	100	550	100
K28	20	350	450	100
K29	20	350	500	100
K30	20	350	550	100

Tablo 7 ve Tablo 8’da verilen deney parametrelerine göre her bir numuneye K1’den başlamak üzere K30’a kadar isim verilmiştir. K1’den K18’e kadar olan deneyler Ti ilavesiz solüsyonda, K19’dan K30’a kadar olan deneyler ise Ti ilaveli solüsyonda kaplanan numuneleri göstermektedir.

3.3 Numunelerin Kaplanması

Numunelerin kaplanması işlemi Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nün Plazma Elektrolitik Oksidasyon Laboratuvarında bulunan *PlasmaTechnol* marka ve alternatif akımla çalışan kaplama cihazında yapılmıştır(Şekil 28). Kaplama ünitesinde tüm veri giriş ve kontrolleri dijital olarak yapılmaktadır. Cihaz, negatif ve pozitif voltaaj, negatif ve pozitif akım, işlem süresi, pozitif vuruş süresi, iki vuruş arası bekleme süresi ve pozitif ile negatif vuruş tekrar sayıları gibi parametreleri değiştirebilme imkânına sahiptir. Ayrıca kaplama ünitesi osiloskop, kontrol paneli, mekanik karıştırıcı ve kaplamanın gerçekleştiği hazneden meydana gelmektedir. Hazne içindeki yuvasına yerleştirilmiş numune, istenen kaplama süreci boyunca solüsyon içerisinde askıda tutulmuştur. Her bir numunenin kaplanmasında kullanılacak olan deneysel parametreler çalışma programına göre kontrol panelinden girilerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 28. Mikro Ark Oksidasyon Cihazı

Mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplamada, kaplama solüsyonu en önemli etkenlerden biri olması nedeniyle solüsyon 2 litrelik saf suyun içine Tablo 9'daki kimyasalları ilave edip manyetik karıştırıcı ile tamamen homojen olana kadar dikkatli bir şekilde hazırlanmıştır (Şekil 29). Hazırlanan çözelti daha sonra MAO cihazının haznesine boşaltılarak kaplama işleminde kullanılmıştır. İkinci bir deneyde solüsyon cihazın haznesinin alt kısmında bulunan tahliye musluğundan kullanılmış solüsyon boşaltılarak yerine yenisi konulmuştur (Şekil 30).

Tablo 9. Solüsyonda kullanılan kimyasallar ve miktarları

Kimyasal Adı	Miktar (gr/lt)
Na_3PO_4 (Sodyumfosfat)	4
KOH (Potasyumhidroksit)	1
NaAlO_2 (Sodyumalüminat)	3
Ti(Titanyum ilaveli kaplamalar)	0,8



Şekil 29. Deneyde kullanılan manyetik solüsyon karıştırıcısı



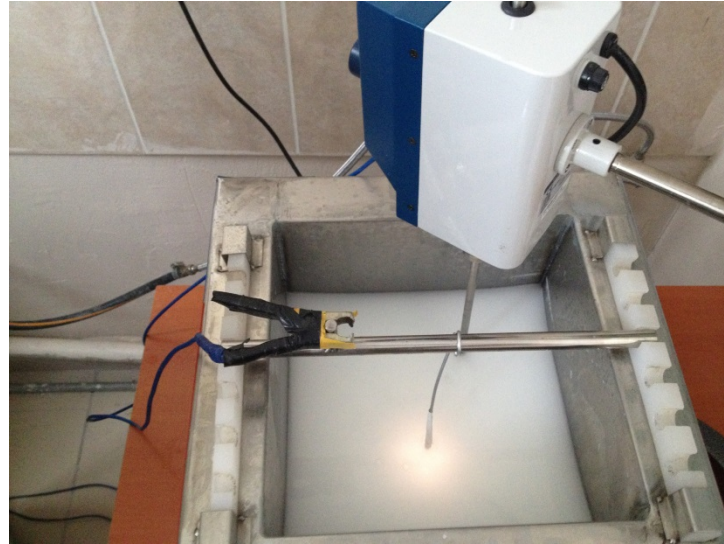
Şekil 30. Mekanik karıştırıcılı kaplama haznesi

Hazırlanan numuneler, MAO kaplama düzeneğindeki numune yatağına, daha önceden üzerinde açılmış olan delikten anot olacak şekilde ve hazneden yalıtılmış olarak yerleştirilmiştir (Şekil 30). Hazne ise katot olacak şekilde cihaza bağlanmış ve anota yani numuneye negatif; katota yani hazneye pozitif kutbuna bağlanarak anot üzerinde oksit kaplanması işlemine hazır hale getirilmiştir. Kontrol ünitesine, daha önce belirlenmiş olan deney parametreleri ayrı ayrı girilerek cihaz kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Kaplama

esnasında cihaz üzerinde çok yüksek akım ve voltaj bulunduğunda gerekli güvenlik tedbirleri (yalıtım, kısa devrenin önlenmesi vs) alınmıştır. Bütün bu işlemler sonucunda MAO cihazı çalıştırılarak kaplama süreci başlatılmıştır. (Şekil 31 ve 32)



Şekil 31. Numune kaplama esnasındaki görüntüsü (Ti ilavesiz kaplama)



Şekil 32. Kaplama esnasında numune ve haznenin görüntüsü (Ti ilaveli kaplama)

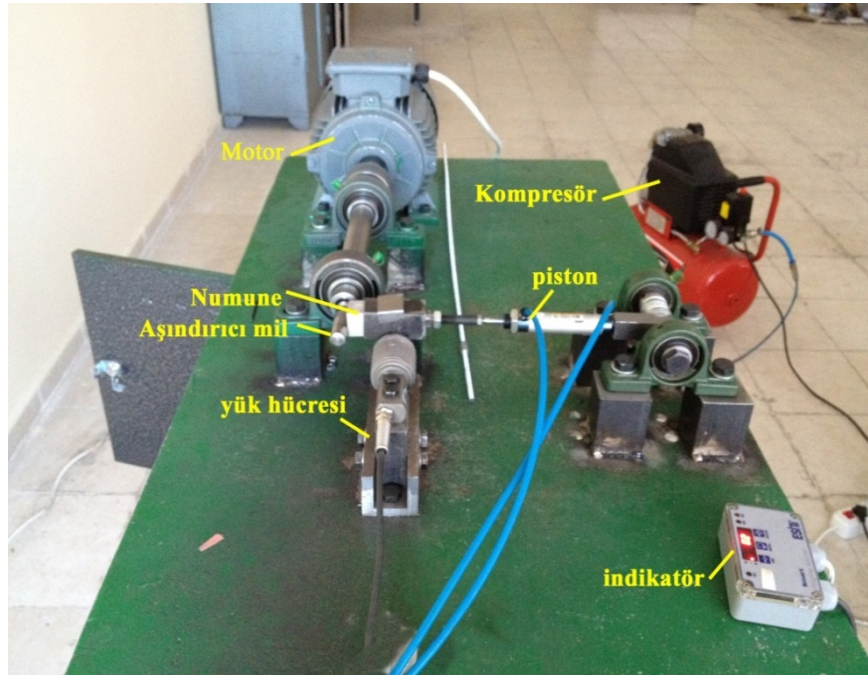
Mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplama işlemi Tablo 7 ve 8’de belirlenen parametreler doğrultusunda tamamlanmıştır. Kaplanan numuneler daha sonra alkolle temizlenmiş ve ardından sıcak hava üflenerek kurutulmuştur. Bütün numuneler için aynı işlem tekrar edilerek birinci aşama olan kaplama işlemi tamamlanmıştır.

3.4 Kaplanan Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçümü

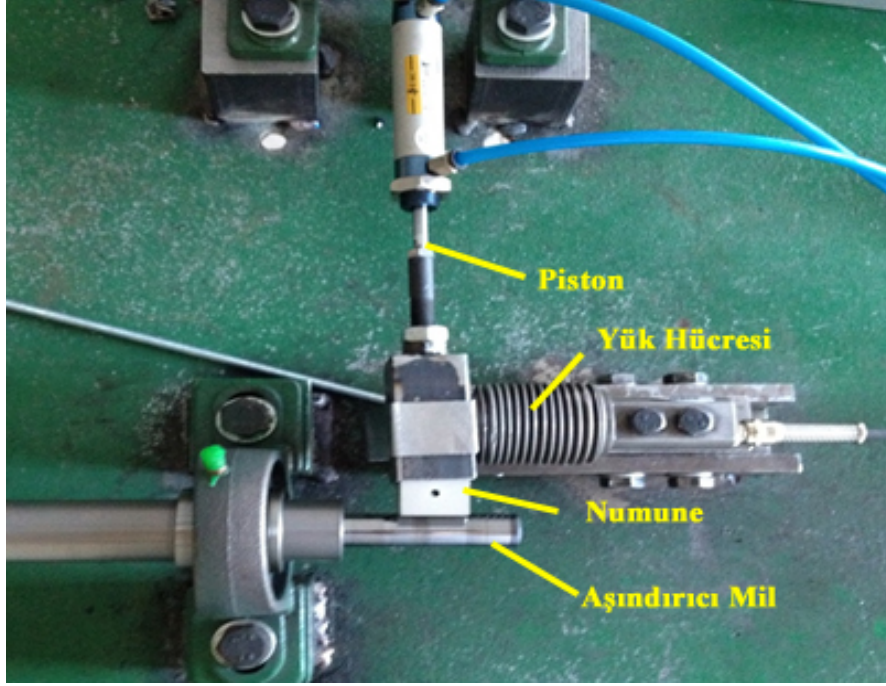
Numunelerin yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo SJ-201 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri ölçülmeden önce numuneler alkolle temizlenmiş ve ölçüm sırasında oluşabilecek titreşim vb. dış etkenler için gerekli tedbirler alınmıştır. Ölçümlerde yüzey pürüzlülük cihazının numune uzunluğu $\lambda_c=0.8$ ve numune sayısı 5 seçilmiş ve cihaz kalibrasyon numunesi ile her deneyden önce kalibre edilmiştir.

3.5 Kaplanan Numunelerin Aşınma Deneylerinin Yapılışı ve Ölçümü

Aşınma deneyleri elmas aşındırıcılı Blok-halka (block-on-disc) test cihazında 50 m/dak devir sayısı ve 2 kgf (≈ 2 daN) kuvvet uygulayarak yapılmıştır. Deney numunesi aşındırıcı mil üzerine pnömatik sistemle temas ettirilmiştir. Temas kuvveti, sistemdeki valf yardımıyla ayarlanmış, yük hücresi ile kontrol edilmiştir. Elektrik motoruna bağlı olan ve dönen aşındırıcı disk üzerine numune 2 daN kuvvet altında piston yardımıyla pnömatik olarak bastırılarak aşınma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 500, 1000 ve 1500 metre aşınma mesafelerinin sonunda hassas terazide ölçülmüş ve aşınma miktarları kayıt edilmiştir. (Şekil 33 ve 34)



Şekil 33. Aşınma Tezgâhı



Şekil 34. Numune tutucusu ve aşındırıcı elmas mil

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

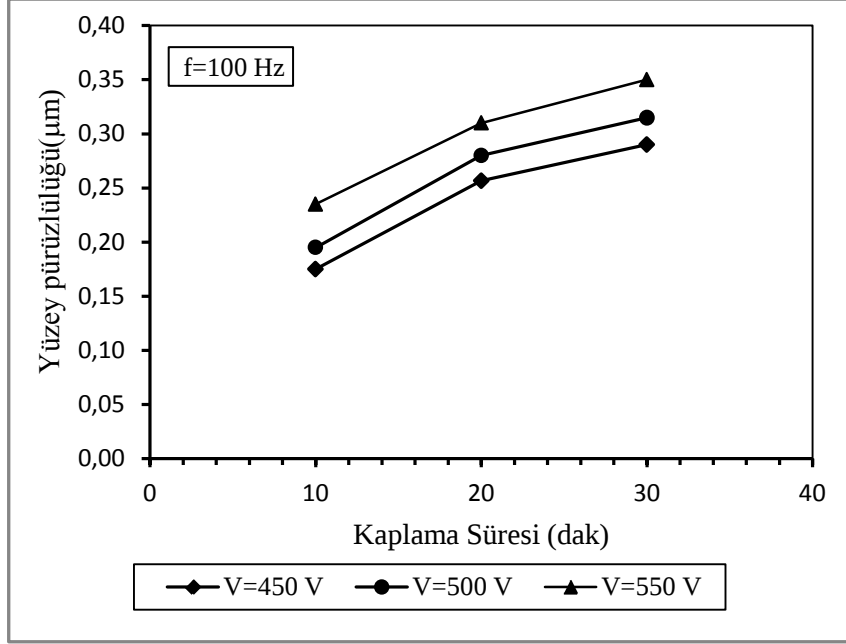
Alüminyum (Al7075) altlık malzeme üzerine mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemiyle yapılan kaplamaların aşınma davranışları ve yüzey pürüzlülükleri farklı frekans, voltaj ve kaplama süresi dikkate alınarak ayrı ayrı incelenerek grafikler haline getirilmiştir. Ayrıca farklı deney parametrelerine göre elde edilen kaplamaların EDX analizleri ve SEM görüntüleri aşınma davranışlarına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değerlendirilmiştir.

4.1 Kaplanan Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin İncelenmesi

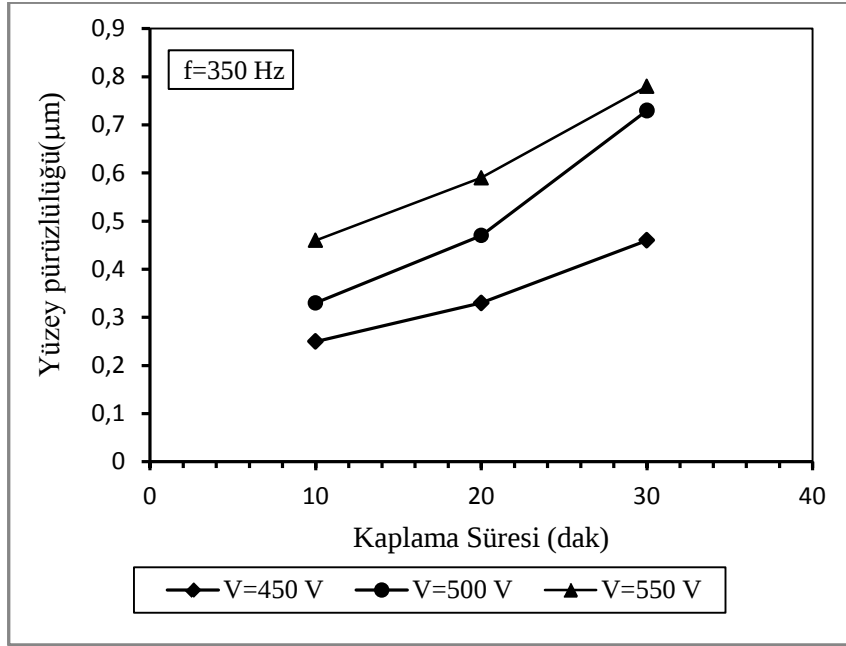
Kaplama numunelerin yüzey pürüzlülükleri(R_a) üç farklı bölgeden ayrı ayrı ölçülmüş ve ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak (Tablo 10) grafikler haline getirilmiştir(Şekil 35, Şekil 36, Şekil 38, Şekil 40).

Tablo 10. Kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Numune Kodu	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a)	Numune Kodu	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a)
K1	0,18	K16	0,36
K2	0,20	K17	0,64
K3	0,24	K18	0,81
K4	0,25	K19	0,20
K5	0,33	K20	0,22
K6	0,46	K21	0,27
K7	0,26	K22	0,32
K8	0,28	K23	0,41
K9	0,31	K24	0,51
K10	0,33	K25	0,22
K11	0,47	K26	0,23
K12	0,59	K27	0,33
K13	0,29	K28	0,57
K14	0,32	K29	0,73
K15	0,35	K30	0,78



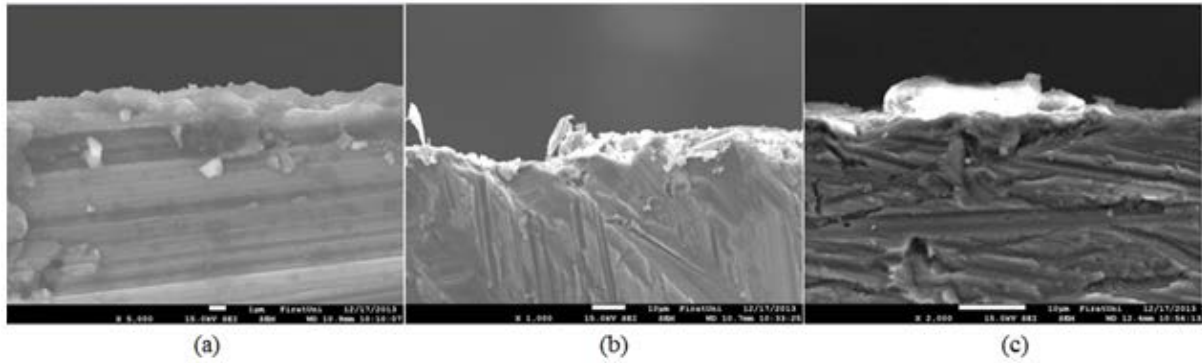
Şekil 35. Kaplama voltajının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon)



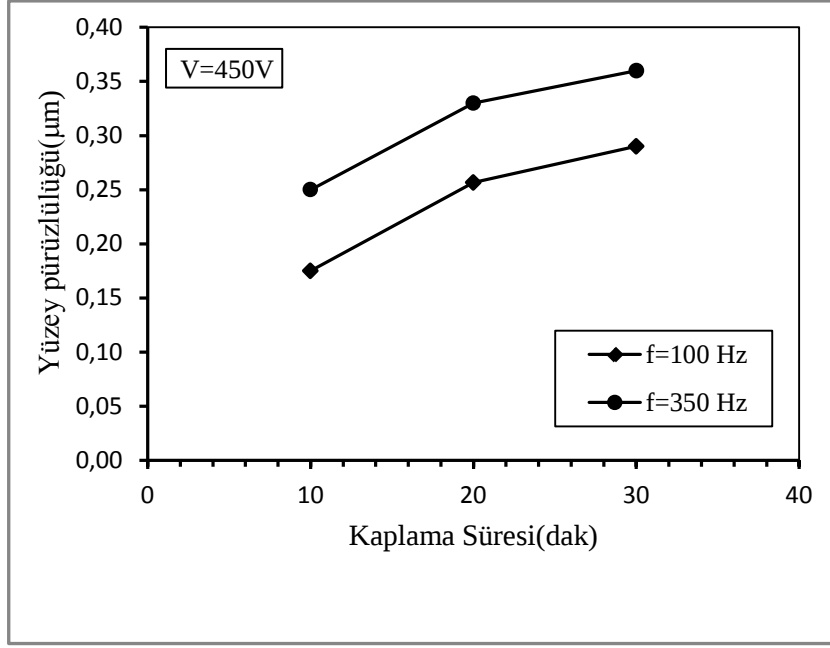
Şekil 36. Kaplama voltajının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon)

Şekil 35 ve 36’da farklı voltaj ve kaplama sürelerinde kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır. Voltaj arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Şekil 36’ya göre 10 dakika süreyle ve 450 V değerinde kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,25 μm

iken 500V'ta kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,33 μm ve 550V'ta kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü %80 artarak 0,46 μm elde edilmiştir. 20 dakika süreyle kaplanan numunelerde ise 450V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,33 μm , 500V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,47 μm ve 550V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,59 μm olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 30 dakika süreyle kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde 450V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,46 μm olarak ölçülmüştür. 500V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,73 μm olarak ve 550V'ta yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğüne baktığımızda ise yüzey pürüzlülüğü 0,78 μm olarak ölçülmüştür. 30 dakika kaplama süresinde 550 V elde edilen yüzey pürüzlülüğü 450 V değerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğüne göre 1,7 kat artmıştır. Bu artışın sebebi voltaj miktarının artmasıyla kaplama esnasında numune yüzeyinde daha şiddetli ark oluşturulmaktadır. Oluşan bu arkın neticesinde kaplama malzemesi altlık yüzeyinde düzensiz bir birikim meydana getirerek yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Kaba ve gözenekli yüzey yapısından dolayı kaplamanın sürtünme katsayısının, alaşımlı altlık malzemenin ilk durumundaki sürtünme katsayısından daha yüksek çıktığı bildirilmiştir[11]. Şekil 37'de SEM görüntüleri incelendiğinde 450 V değerinde yapılan kaplamada yüzeyin 500 ve 550 V değerine göre daha düzgün ve düzenli olduğu buna karşılık voltaj değerinin artmasıyla kaplamada bölgesel birikimlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü artmıştır.

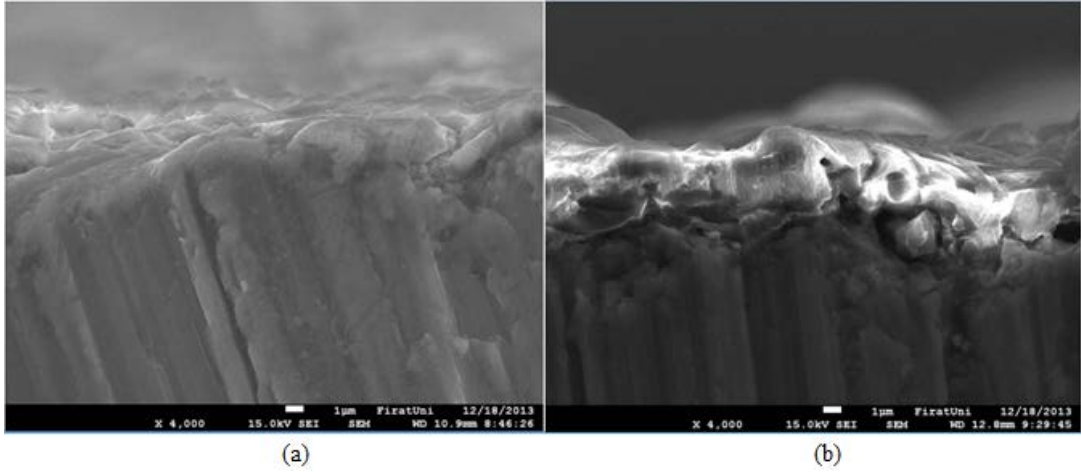


Şekil 37. Farklı voltaj ve 100 Hz değerlerinde 10 dakika kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (a.450 V, b.500, c.550 V)

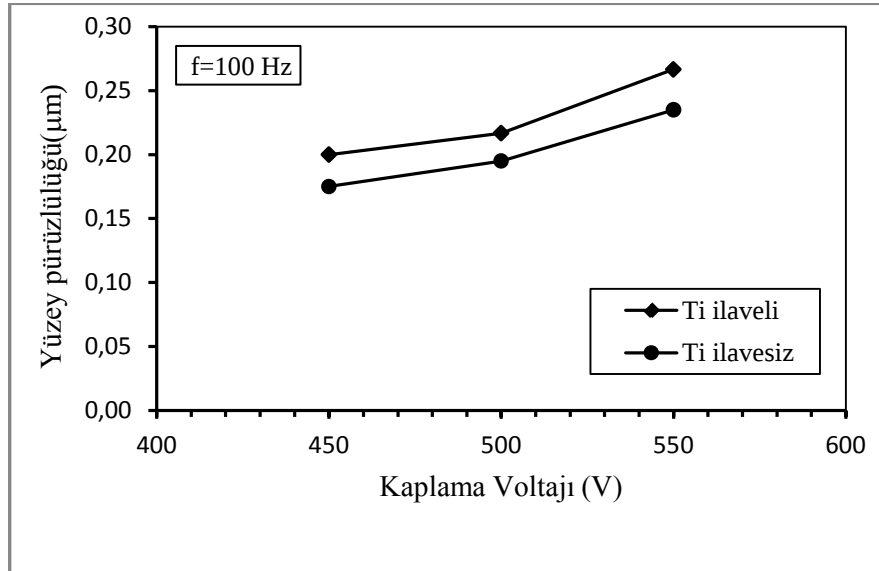


Şekil 38. Kaplama frekansının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Ti ilavesiz solüsyon)

Şekil 38’de titanyum ilavesiz solüsyonda yapılan kaplamada, frekansın yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi gösterilmiştir. Hem 100 Hz hem de 350 Hz değerlerinde kaplama süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Grafiğe göre 10 dakika kaplama süresi ve 100 Hz frekans değerinde yüzey pürüzlülüğü 0,18 μm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı kaplama süresi için frekans değeri 350 Hz değerine çıktığında ise yüzey pürüzlülüğü 1,4 kat artarak 0,25 μm elde edilmiştir. 20 dakika kaplama süresi ve 100 Hz frekans değerinde ise yüzey pürüzlülüğünün 0,26 μm olduğu buna karşılık aynı kaplama süresi için frekans değeri 350 Hz değerine çıktığında yüzey pürüzlülüğü 1,3 kat artarak 0,33 μm değerine ulaşmıştır. Frekansın artması birim zamanda geçen elektron sayısını artırmakta ve altlık malzemesi yüzeyinde daha fazla kaplama malzemesinin düzensiz olarak birikmesine neden olduğu düşünülmektedir. Şekil39’daki SEM görüntüsü incelendiğinde frekans değerinin artmasıyla birlikte altlık malzemesi yüzeyinde daha düzensiz bir yapı birikmesinin olduğu görülmektedir.



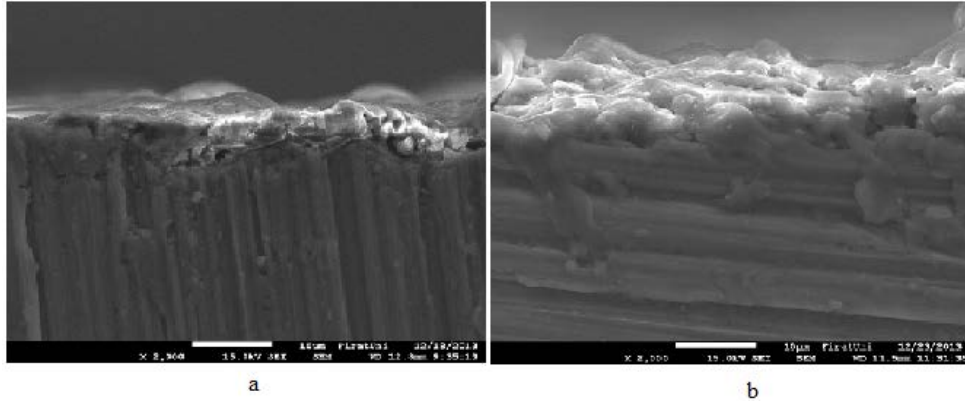
Şekil 39. Farklı frekans ve 550 V değerlerinde 20 dakika kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (a.100 Hz b.350 Hz)



Şekil 40. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması

Şekil 40'da titanyum ilavesiz solüsyonda kaplanan numuneler ile titanyum ilaveli solüsyonda kaplanan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. 450V değerine bakıldığında Ti ilavesiz solüsyonda kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,18 µm iken Ti ilaveli solüsyonda yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,20 µm olarak ölçülmüştür. 500V değerine bakıldığında Ti ilavesiz solüsyonda kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,20 µm iken Ti ilaveli solüsyonda yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 0,22 µm olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 550V'ta yapılan kaplamalara bakıldığında ise Ti ilavesiz solüsyonda kaplanan numunenin yüzey pürüzlülüğü 0,24 µm iken Ti ilaveli solüsyonda

yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 1,12 kat artmış ve 0,27 μm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar göre kaplama solüsyonuna titanyum ilavesinin kaplama kalınlığını artırarak altlık malzeme yüzeyinde daha düzensiz birikmeye neden olduğu görülmüştür(Şekil 40). Bu durum Ti ilaveli kaplamaların yüzey pürüzlülüklerinin Ti ilavesiz kaplamalara göre daha büyük çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 41. Ti ilavesinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi (a.Ti ilavesiz b.Ti ilaveli numune)

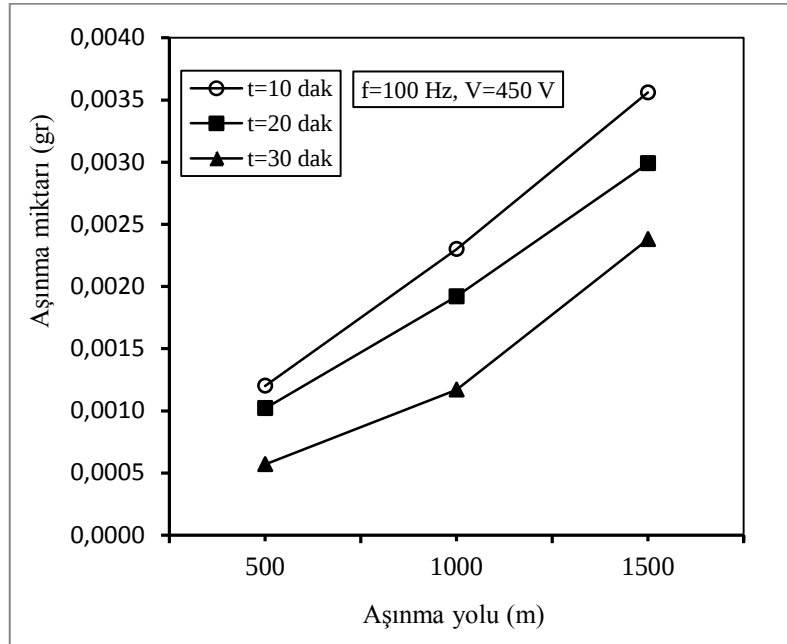
4.2 Aşınma Davranışının İncelenmesi

Numuneler kaplama sonrası ve aşınma sonrası olmak üzere ayrı ayrı 10^{-5} gr hassasiyetindeki elektronik terazide 500m, 1000m ve 1500m aşındırma yoluna göre 3 farklı şekilde tartılmış ve her bir aşındırma yolu için aşınma miktarları belirlenerek (Tablo 11) grafikler haline getirilmiştir(Şekil 42, Şekil 44, Şekil 46).

Tablo 11. Aşınma Deney Sonuçları

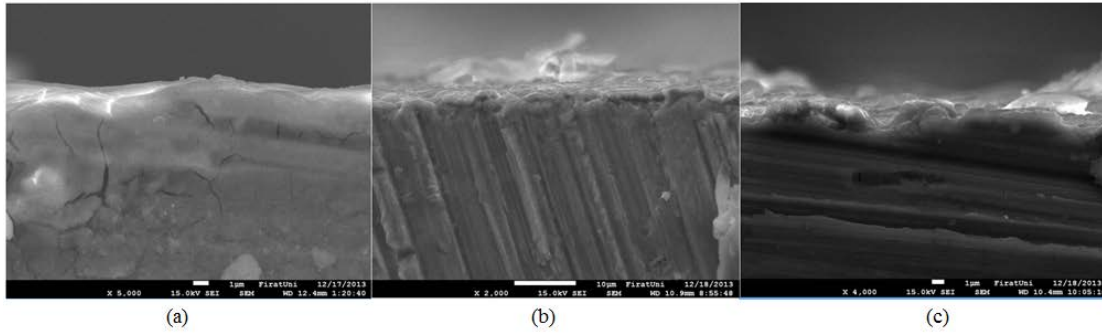
Numune kodu	Aşınma miktarı (gr)		
	500m sonunda	1000m sonunda	1500m sonunda
K1	0,00120	0,00230	0,00356
K2	0,00122	0,00262	0,00368
K3	0,00098	0,00209	0,00315
K4	0,00095	0,00202	0,00280
K5	0,00075	0,00182	0,00245
K6	0,00064	0,00193	0,00292
K7	0,00102	0,00192	0,00299

K8	0,00108	0,00212	0,00308
K9	0,00085	0,00176	0,00312
K10	0,00088	0,00179	0,00272
K11	0,00085	0,00220	0,00333
K12	0,00078	0,00161	0,00252
K13	0,00057	0,00117	0,00238
K14	0,00068	0,00133	0,00196
K15	0,00073	0,00153	0,00225
K16	0,00052	0,00098	0,00174
K17	0,00027	0,00062	0,00088
K18	0,00041	0,00061	0,00090
K19	0,00085	0,00169	0,00226
K20	0,00101	0,00153	0,00187
K21	0,00062	0,00105	0,00192
K22	0,00041	0,00112	0,00161
K23	0,00085	0,00120	0,00156
K24	0,00052	0,00088	0,00149
K25	0,00104	0,00178	0,00240
K26	0,00076	0,00125	0,00179
K27	0,00068	0,00147	0,00195
K28	0,00047	0,00143	0,00216
K29	0,00045	0,00101	0,00149
K30	0,00050	0,00055	0,00127

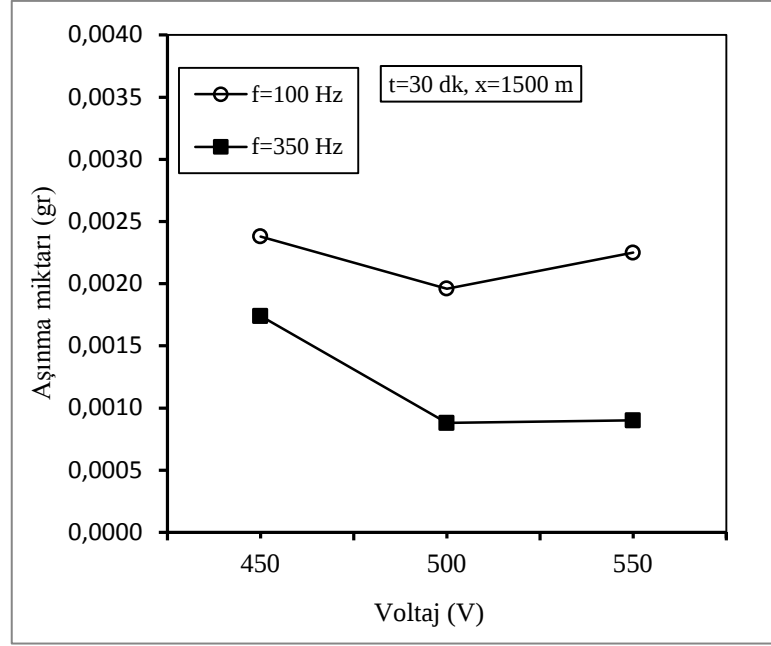


Şekil 42. Kaplama süresi ve aşınma yolunun aşınma miktarına etkisi ($f=100\text{Hz}$, $V=450\text{V}$)

Farklı sürelerde yapılan kaplamalarda, kaplama süresi arttıkça aşınma miktarı azalmıştır. Şekil 42’da kaplama süresinin aşınma miktarına olan etkisi incelendiğinde 500m aşındırma yolu için 10 dakika kaplanan numunedeki aşınma miktarı 120×10^{-5} gr; 20 dakika kaplanan numunedeki aşınma miktarı 102×10^{-5} gr ve 30 dakika kaplanan numunedeki aşınma miktarı azalarak 57×10^{-5} gr elde edilmiştir. Aynı şekilde 1000 m aşındırma yolu incelendiğinde 10 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı 230×10^{-5} gr; 20 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı 192×10^{-5} gr ve 30 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı ise 117×10^{-5} gr elde edilmiştir. 1500 m sonundaki aşınma miktarları incelendiğinde ise 10 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı 356×10^{-5} gr 20 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı 299×10^{-5} gr ve 30 dakika kaplanan numunenin aşınma miktarı ise 238×10^{-5} gr elde edilmiştir. Kaplama süresinin artması altlık malzemesi yüzeyinde daha fazla miktarda kaplama malzemesinin birikmesine neden olmaktadır (Şekil 42). Bu durum malzeme yüzeyinde biriken oksit tabakasının kalınlığını artırarak daha dirençli bir yapı meydana gelmektedir. Düşük kaplama kalınlıklarında aşındırıcı disk kaplama malzemesini kısa sürede ortadan kaldırmakta ve daha yumuşak olan ana altlık malzemesini de aşındırmaktadır. Elde edilen bu sonuç Özkara ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarla uyum göstermiştir[6].

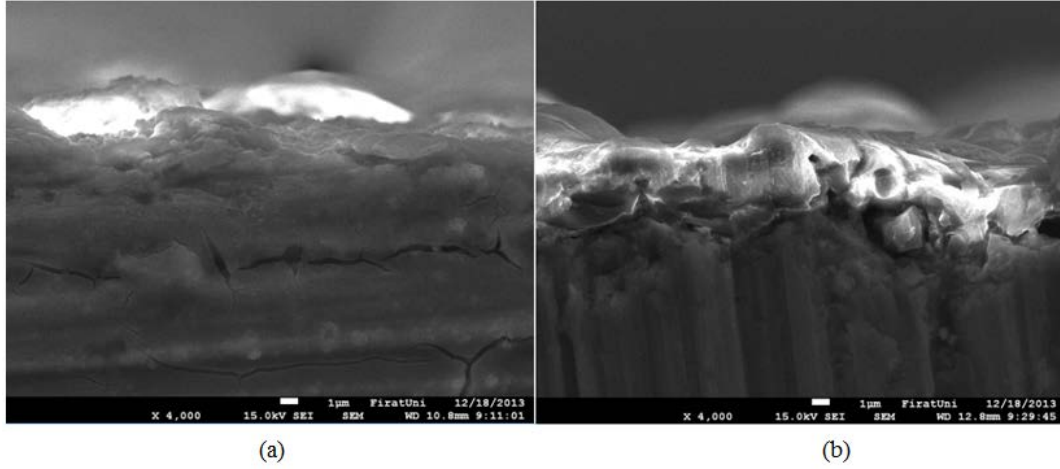


Şekil 43. Farklı kaplama süreleri, 550 V ve 100Hz değerinde kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (a.10 dak, b.20 dak,c.30 dak.)



Şekil 44. Voltaj değerinin aşınma miktarına olan etkisi

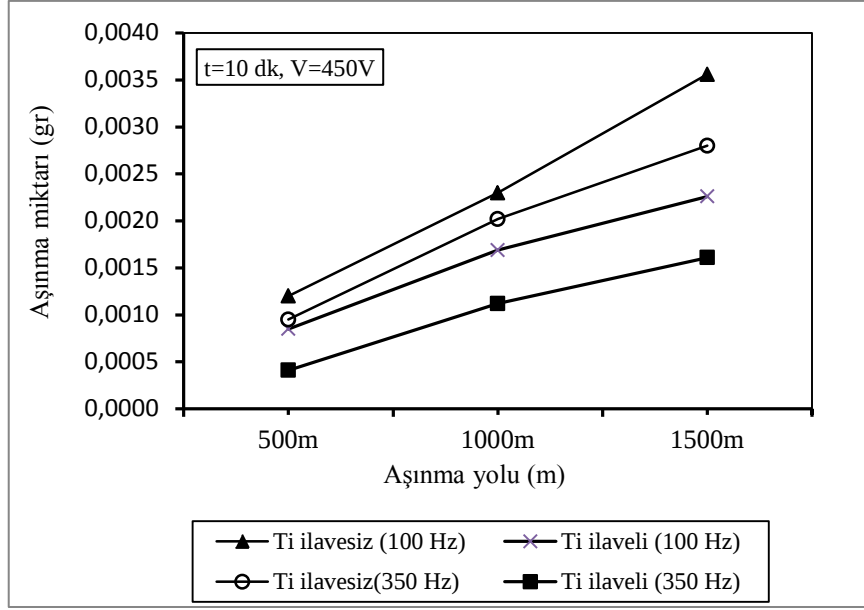
Şekil 44’de 100 ve 350 Hz frekanslarda kaplanan numunelerin aşınma miktarları karşılaştırılmıştır. Frekans arttıkça aşınma miktarı azalmaktadır. 450V değerinde kaplanan numunelere bakıldığında 100 Hz frekans değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 238×10^{-5} gr iken 350 Hz frekans değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 174×10^{-5} gr olarak ölçülmüştür. 500 V’ta yapılan kaplamada 100 Hz frekans değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 196×10^{-5} gr iken 350 Hz değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı ise 88×10^{-5} gr olarak elde edilmiştir. Yine aynı şekilde 550V değerinde kaplanan numunelerde ise 100Hz frekans değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 225×10^{-5} gr olurken 350 Hz frekans değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 90×10^{-5} gr olmuştur. Frekans değerinin artması kaplama kalınlığını artırmıştır (Şekil 36). Bu durum altlık malzemeye göre daha sert bir tabaka olan kalın kaplama malzemesinin geç aşınmasına neden olarak birim zamandaki aşınma miktarını azaltmıştır. Ayrıca Şekil 44 incelendiğinde, 100 Hz frekansta kaplanan numunelere bakıldığında 450 V değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 238×10^{-5} gr iken 500 V değerinde kaplanan numunenin aşınma miktarı 196×10^{-5} gr olarak elde edilmiştir. 550 V değerlerinde ise 225×10^{-5} gr olarak elde edilmiştir. 550 V değerinde elde edilen değer 500 V değerinde elde edilen değerle hemen hemen aynı olmuştur. Voltaj arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Fakat artan kaplama kalınlığı ile daha düzensiz bir yapı meydana gelmekte ve aşınma olumsuz etkilenmektedir (Şekil 44). Kalınlık arttıkça daha pürüzlü bir yapı elde edilmekte bu da daha fazla aşınmaya neden olmaktadır.



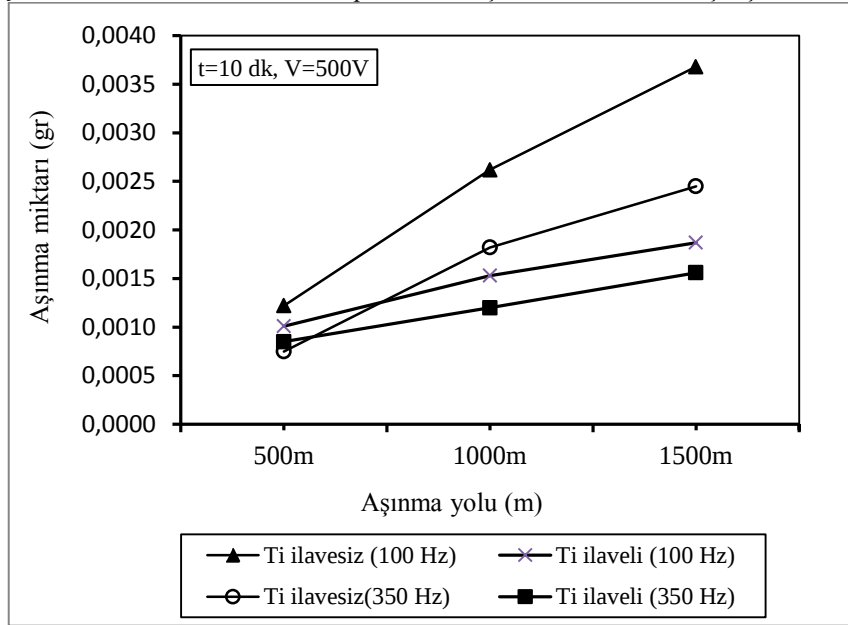
Şekil 45. Farklı voltaj ve 350 Hz değerlerinde 20 dakika kaplanan numunelerin SEM görüntüleri (a.450 V, b.550 V)

Şekil 45'ten Şekil 52'ye kadar olan grafiklerde Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 52'de Ti ilavesiz solüsyon ile kaplanan numuneler ile Ti ilaveli solüsyonda kaplanan numunelerin aşınma miktarları karşılaştırılmıştır. 500 m aşındırılan numunelerin aşınma miktarlarına bakıldığında ti ilavesiz solüsyon içinde kaplanan numune 120×10^{-5} gr, Ti ilaveli solüsyonda kaplanan numune 85×10^{-5} gr aşınmıştır. 1000 m aşındırıldıktan sonra karşılaştırıldığında Ti ilavesiz solüsyon ile kaplanan numune 230×10^{-5} gr, Ti ilaveli solüsyonda kaplanan numune 169×10^{-5} gr aşınmıştır. Aynı şekilde 1500 m aşındırıldıktan sonra karşılaştırıldığında Ti ilavesiz solüsyon ile kaplanan numune 356×10^{-5} gr, Ti ilaveli solüsyonda kaplanan numune 226×10^{-5} gr aşınmıştır. Kaplama solüsyonuna ilave edilen Ti tozları kaplamanın içeriğine nano partikül olarak katıldığı için aşınma miktarını önemli ölçüde azaltmıştır.

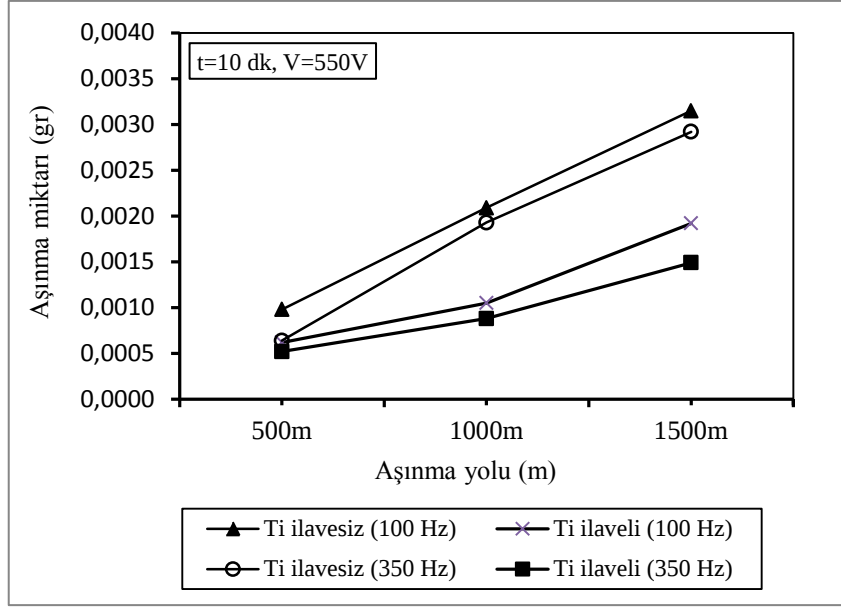
Ti ilaveli kaplamanın yapısının bölgesel EDX analizi yapıldığında kaplama yapısının Al_2O_3 olduğu bununla beraber Al_2O_3 tabakasının içinde Ti partiküllerinin serbest halde bulunduğu tespit edilmiştir(Şekil 53). Hong-Xia Li ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmaların sonucunda, uygun konsantrasyonda Ti ilave edildiğinde kaplamanın yapısında bazı nano Ti parçacıkların oluştuğunu ifade etmişlerdir[2]. Bu durumda serbest halde bulunan partiküller kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü artmasına karşılık aşınma miktarını azaltmıştır.



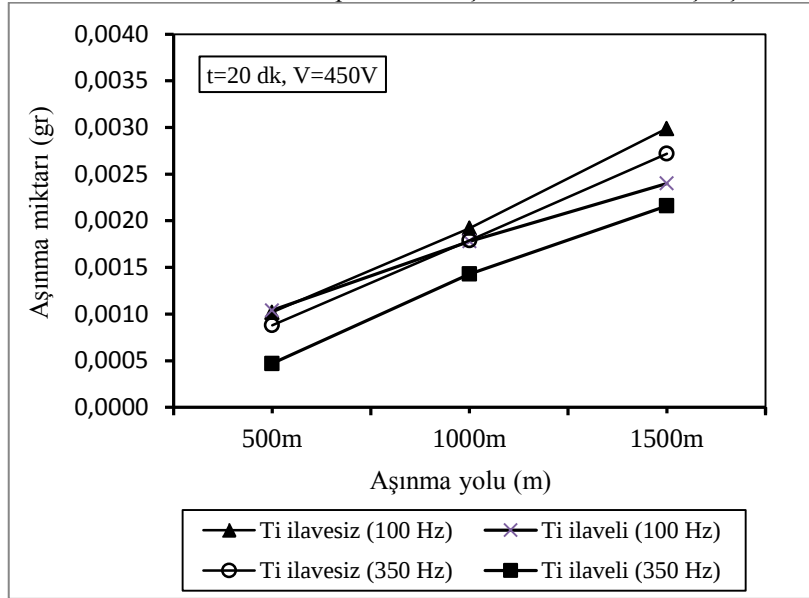
Şekil 46. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-1



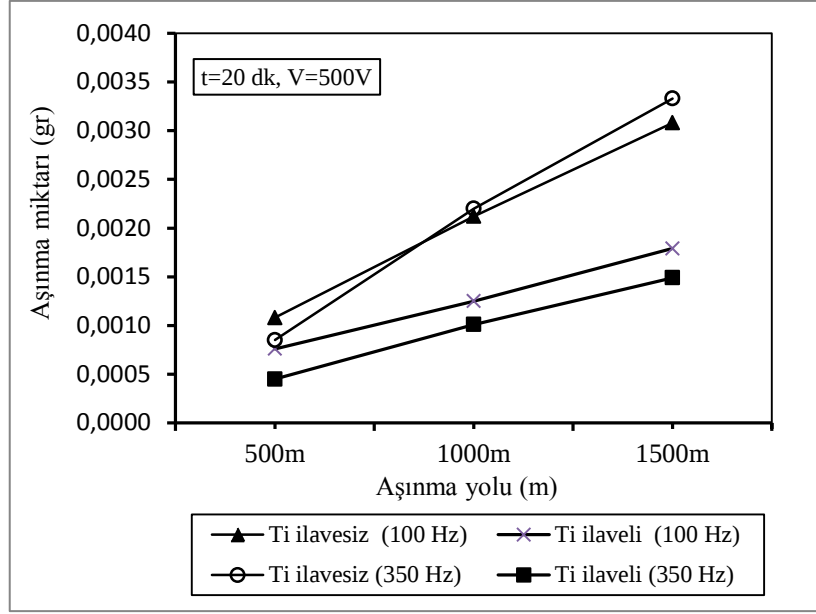
Şekil 47. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-2



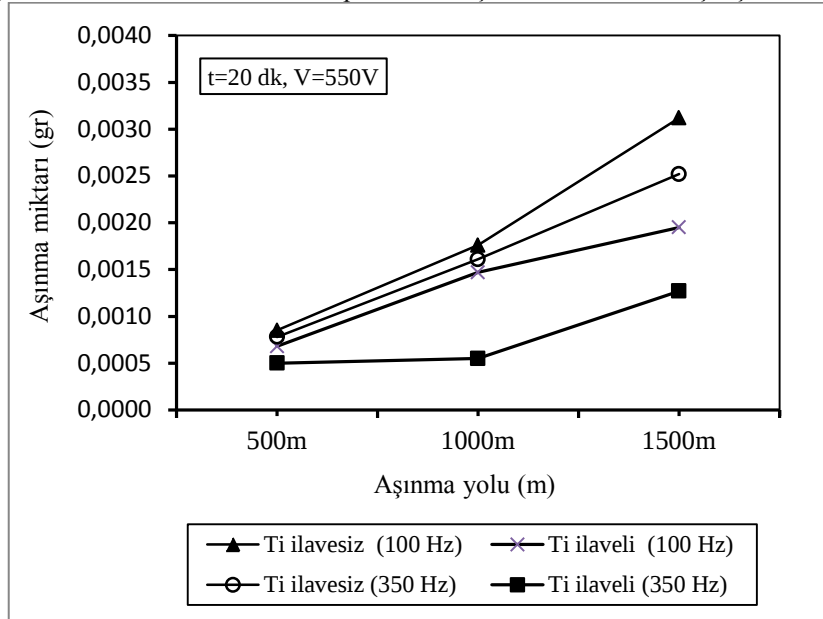
Şekil 48. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-3



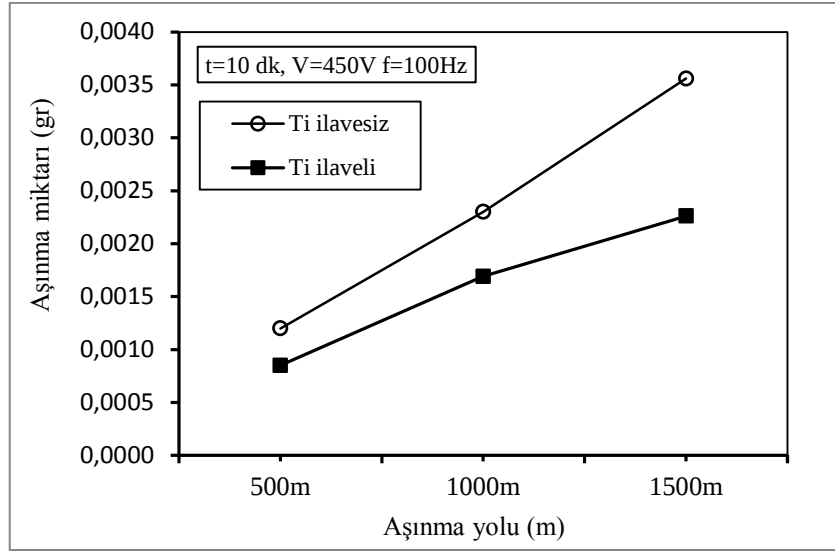
Şekil 49. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-4



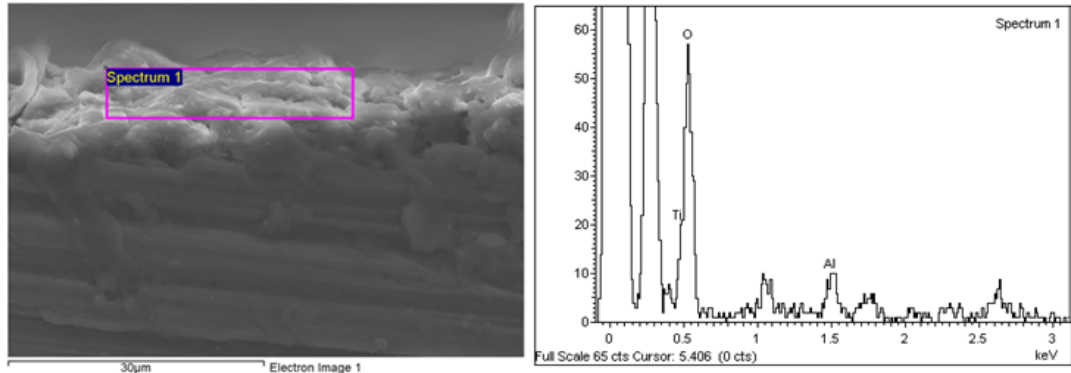
Şekil 50. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-5



Şekil 51. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-6



Şekil 52. Ti ilaveli ve ilavesiz kaplamaların aşınma miktarının karşılaştırılması-7



Spectrum processing:
Peak possibly omitted: 1.050 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard:
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	14.53	2.3152	88.69	3.29	93.05
Al K	0.69	0.8886	10.99	2.49	6.83
Ti K	0.02	0.7974	0.33	2.44	0.11
Totals			100.00		

Şekil 53. Titanyum ilaveli Al_2O_3 kaplamanın EDX analiz sonucu(350 Hz 550V ve 20 dak. kaplama süresi)

5 GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Al7075 T651 malzemesi mikro ark oksidasyon metodu ile potasyum hidroksit(KOH), sodyum alüminat(NaAlO_2) ve sodyum fosfat(Na_3PO_4) solüsyonu karışımında Ti ilaveli ve Ti ilavesiz olarak kaplanmıştır. Kaplama parametreleri (voltaj, frekans ve kaplama süresi) ile Ti ilavesinin etkisi incelenmiştir. Bu inceleme neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kaplama esnasında uygulanan voltaj değerinin artması kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü artmıştır. Bu artışın sebebi voltaj miktarının artmasıyla kaplama esnasında numune yüzeyinde daha fazla kıvılcım oluşturulmaktadır. Oluşan bu kıvılcımın neticesinde altlık üzerinde kaplama malzemesi düzensiz bir birikim meydana getirerek yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır.
- Kaplama esnasında uygulanan frekans değeri arttıkça kaplamanın yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Frekansın artması birim zamanda geçen elektron sayısını artırmakta ve altlık malzemesi yüzeyinde daha fazla kaplama malzemesinin düzensiz olarak birikmesine neden olmaktadır. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır.
- Kaplama süresinin artması yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bunun sebebi kaplama süresinin artmasıyla beraber yüzeyde daha uzun süre kıvılcım meydana gelmesi ve daha kalın ve düzensiz bir kaplama oluşmasıdır.
- Kaplama solüsyonuna eklenen Ti tozları kaplamanın yüzey pürüzlülük değerini arttırıcı bir etki göstermiştir. Bunun sebebi kaplama esnasında altlık malzemesi üzerinde oluşan titanyum yapısıdır. Nano boyuttaki Ti partikülleri ve kaplama esnasında titanyum ve alüminyumoksit olarak altlık malzemesi üzerinde birikmekte, bu da yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır.
- Kaplama esnasında uygulanan voltaj miktarı arttıkça kaplamanın aşınma miktarı azalmıştır. Voltaj miktarının artması kaplama kalınlığını artırmaktadır. Bu durum aşınma miktarını azaltmıştır.
- Kaplama esnasında uygulanan frekans değeri arttıkça kaplamanın aşınma miktarı azalmıştır.

- Kaplama süresi arttıkça kaplama kalınlığı artmış ve buna bağılı olarak aşınma miktarı azalmıştır.
- Kaplama solüsyonuna eklenen Ti ilavesi ile kaplanan numunelerin aşınma miktarını azaltmıştır.

6 KAYNAKLAR

- [1] **Başak N.,H.,K.**, PEO Teknolojisi Uygulanan 6082 Alüminyum Alaşımlarının Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi F.B.E., Eylül 2008.
- [2] **Li H., Song R., Ji Z.**, Effects of nano-additive TiO₂ on performance of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 aluminum alloy, 2012
- [3] **Sebatini G., Cheschini L., Martini C., Williams J., A., Hutchings I.M.**, Improving sliding and abrasive wear behaviour of cast A356 and wrought AA7075 aluminium alloys by plasma electrolytic oxidation. İtalya, 2009.
- [4] **Wasekar, N.**, 2007, Effect Of Micro Arc Oxidation Coatings On Corrosion Resistance Of 6061-Al Alloy.
- [5] **Wen L.**, 2009, Corrosion evaluation of microarc oxidation coatings formed on 2024 aluminium alloy.
- [6] **Özkara İ., Baydoğan M.**, 2009, Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Voltaj Uygulama Süresinin 2024 Kalite Alüminyum Alaşımının Morfolojik Özelliklerine ve Aşınma Direncine Etkisi. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [7] **Gençer Y., Tarakçı M., Cengiz S.**, Saf Zirkonyumun Mikroark Oksidasyon Yöntemiyle Oksit Esaslı Seramik Kaplanması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 2011.
- [8] **Xu L., Liu F., Wang P., Yu D., Zhao C.**, The corrosion resistance behavior of Al₂O₃ coating prepared on NiTi alloy by micro-arc oxidation, China, 2007.
- [9] **Arslan E., Totik Y., Demirci E., E., Vangölü Y., Alsaran A., Efeoğlu E.**, High temperature wear behavior of aluminum oxide layers produced by AC micro arc oxidation, Erzurum, 2009.
- [10] **Li H., Rudnev V., Zheng H., Yarovaya P., Song G.**, Characterization of Al₂O₃ ceramic coatings on 6063 aluminum alloy prepared in borate electrolytes by micro-arc oxidation, China, 2007.
- [11] **Zhu H., Cai B., Lin Z., Ren D., Tan J., Zhou R.**, Fretting wear behaviour of ceramic coating prepared by micro-arc oxidation on Al-Si alloy, China, 2007.
- [12] **Gang S., Xin S., Rong Z., Fang H.**, Properties of aluminium oxide coating on aluminium alloy produced by micro-arc oxidation, China, 2005

- [13] **Tian J., Luo Z., Qi S., Sun X.**, Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy, China, 2001.
- [14] **Nie X., Leyland A., Song H., Yerokhin A., Sowe S., Matthews A.**, Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys, China.
- [15] **Timur ULUCAK** ders notları <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam1.html> 22.12.2013 Saat 14.04
- [16] **Prof.Dr.Ayşe Akdoğan Eker** Ders Notları
- [17] <http://www.referansmetal.com/mak-oz.htm#7075> 22.12.2013 saat 16.15
- [18] http://www.referansmetal.com/urun_kalip.htm 22.12.2013 saat 16.15
- [19] **Bozkurt T.**, TiN, TiAlN ve AlTiN kaplamaların aşınma performanslarının incelenmesi ve farklı altlık malzemede TiN kaplamanın etkisinin araştırılması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2006
- [20] **Yaz, M., Çelik, H.**, 2007. Cr-Ni'li Paslanmaz Çeliğin Co Esaslı Süper Alaşımlar İle Sert yüzey Kaplanabilirliğinin Araştırılması, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, **19**, 225-233.
- [21] **Ezz, T., Crouse, P., Li, L., Liu, Z.**, 2006. Combined laser/sol-gel synthesis of Si/O/C coatings on mild steel, *Surface & Coatings Technology*, **200**, 6395–6399
- [22] **Yaz, M.**, 2005. Düşük Karbonlu Yumuşak Çeliklerin Co Esaslı Süper Alaşım Elektrotları ile Kaplanabilirliğinin Araştırılması , *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [23] **Ulutan, M.**, 2007. AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, O.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [24] **Çakan, A.**, 2006. AISI 1070 Çeliğinden Üretilen İşlemsiz, Yüzey İşlemleri ve Sert Yüzey Kaplamalı Kesici Takımların Mekanik Özelliklerinin, Mikroyapı ve Kesme Performanslarının İncelenmesi, *Doktora tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [25] **Liu, D. M., Yang, Q., Troczynski, T.**, 2002. Sol-gel hydroxyapatite coatings on stainless steel substrates, *Biomaterials*, **23**, 691-698.
- [26] **Ezz, T., Crouse, P., Li, L., Liu, Z.**, 2006. Combined laser/sol-gel synthesis of Si/O/C coatings on mild steel, *Surface & Coatings Technology*, **200**, 6395–6399.
- [27] <http://www.turkcebilgi.com/ansiklopedi/kaplama>
- [28] **Altunbaş E.**, Polirodaninin Bakır Üzerine Elektrokimyasal Sentezi ve Korozyon Davranışlarının Belirlenmesi, Çukurova Üni. FBE, 2008.

- [29] **Huang P., Zhang Y., Xu K., Han Y.**, Surface modification of Titanium Implant by micro arc oxidation and hydrothermal treatment, *Journal of biomedical materials research bölüm: B Applied Biomaterials*, Cilt 70B, No:2, 187-190, 2004
- [30] **Tan G., Zhang R., Yan Y., Zhu Z.**, Preparation of porous anatase titania film, *materials Letters* Cilt 58, No 12-13, 1857-1860, 2004
- [31] **Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.**, 2005. *Laser Cladding*, CRC Press LLC (pdf form), Chap.1 (1-22), Chap.2 (1-9).
- [32] **Kay, J.F.**, 1988. Bioactive surface coatings: Cause for encouragement and caution. *The Journal Of Oral Implantology*, **141**, pp 43-54.
- [33] **Sun J.**, 2000, Duplex treatment for surface improvement of 2024 Al
- [34] **Jandric, Z., Labudovic, M., Kovacevic, R.**, 2004. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **44**, 785–796.
- [35] **Sarı, N.Y., Yılmaz, M.**, 2005. Ni-Esaslı kaplamaların abrazif + erozif aşınma direncine ısı püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi, *Mühendis ve Makine*, **46**, 14-20.
- [36] **Özel, S.**, 2009. Alüminyum Alaşımı ve Bronzu Yüzeyine Oksit ve Karbür Bileşiklerinin Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanmasının Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37] **Gonzalez, R., Cadenas, M., Fernandez, R., Cortizo, J.L. and Rodriguez, E.**, 2007. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser, *Wear*, **262**, 301-307.
- [38] **Ceylan, İ.**, 2006. Toz Püskürtme Yöntemi ile Boru İç Yüzey Kaplamanın İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [39] **Stokes, J.**, 2003. Production of coated and free-standing engineering components using the HVOF process, *Doktora Tezi*, Dublin City University, Ireland.
- [40] **Harvey, D.**, 1995. The tough truth-wear resistant coatings using HVOF, *TWI Bulletin 1*, 473(1).
- [41] **Bunshah, R.F.**, 2001. *Handbook of hard coatings deposition technologies properties and applications*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. William Andrew Publishing, New York, U.S.A.
- [42] **Brandes, E. A., Brook, G. B.(Editor)**, 1992. *Smithells metals reference book -seventh edition* (pdf form), Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford, UK.

- [43] **Hoppel, H.W., Mughrabi, H., Sockel, H.G., Schmidt, S. and Vetter, G.,** 1999. Hydroabrasive wear behaviour and damage mechanisms of different hard coatings, *Wear*, 225–229, 1088–1099.
- [44] **Güleç, A.,** 2006. Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [45] **Leong, C.,S.,** 2000. Repair/Strengthening of Steel Angles Using Thermal Spray Metallizing, *Master of Science Thesis*, University of Manitoba, Canada.
- [46] **Stokes, J.,** 2006. The theory and application of the HVOF thermal spray process, *Publisher Dublin University*, 204 p.
- [47] **Hazar, H.,** 2004. Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme İle Kaplanarak Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [48] **Khokhryakow E.V, Butyagin P.I, Mamaev A.I,** “Protective Coatings – Formation by MAO” Modern Technique and Technologies Bölüm 6 Material Science, 143-145,2002].
- [49] **Kalkancı N. H.,** Mikro ark oksidasyon teknolojisi ve alüminyum alaşımlı malzemelere uygulanması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi* 2004.
- [50] **Minisker, M.A.,** 2009. Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] **Günyüz, M.,** 2007. Titanyum Ve Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyonu İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul
- [52] **Li, J., Wan, L., and Feng, J.,** 2004. Study on the preparation of titania films for photocatalytic application by miro-arc oXidation, *Solar Energy Materials & Solar Cells*
- [53] **Li, L., Kong, Y., Kim, H., Kim, Y., Kim, H., Heo, S., and Koak, J.,** 2004. Improved biological performance of Ti implants due to surface modification by miro-arc oxidation, *Biomaterials*, 25, 2867-2875
- [54] **Karaoğlu Y.,** Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı Eylül 2006, Sakarya
- [55] **Soydan Y., Ulukan L.,** “Triboloji : Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi”, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi No: 1, Sakarya, 2003.
- [56] **Yılmaz, F.,** “Sürtünme ve Aşınma”, 9th International Metallurgy and Materials Congress, p 229-256, İstanbul, 1997.

- [57] **Mutlu, İ.**, “Seramik Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kasım, 2002.
- [58] **Karagöz, Y.**, “Metallerde Aşınma Yorulması”, İzmir, Mart, 2004.
- [59] **Şişman, L.**, “Bir Aşınma Deney Cihazının Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 1999.
- [60] **Eyre, T. S.**, “Friction and Wear Control in Industry”, Surface Engineering, 1991
- [61] **Moore, M. A.**, “The Relationship Between The Abrasive Wear Resistance”, Wear, 59 65, 1974.
- [62] **Halling, J.**, “Introduction to Tribology”, 1st Ed., Wykeham Publications Ltd., London, 1976.
- [63] **Hutchings, I. M.**, “Friction and Wear Engineering Materials”, London, 1950.
- [64] **Uzuner, H.**, “Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2001.
- [65] <http://www.mta.gov.tr/mineraller/barit.asp> 2006
- [66] **Tekin M.**, Mühendis ve Makine Dergisi, Makine Mühendisleri Odası Basımı, 2008.
- [67] **Kaya H., Cengiz A., Uçar M.**, Talaş Formuna Bağlı Olarak 7075 Al Alaşımının İşlenebilirlik Parametrelerinin Uygunluğunun Tespit Edilmesi, 2010.
- [68] ASM Handbook, 1990
- [69] **Yerokhin, A.**, Al., Plasma Electrolysis for Surface Engineering Surface and Coatings Technology 122 (1999) 73–93, 1999.

ÖZGEÇMİŞ

Aslen Çanakkale'nin Bayramiç ilçesinden olan Mehmet Erbil ÖZCAN, 1988 yılında Aksaray'da doğdu. İlköğretime Çanakkale'nin Gelibolu ilçesinde başlayıp Bayramiç ilçesinde tamamladı. Orta öğretimini Çanakkale Çan İbrahim Bodur Anadolu Lisesi'nde tamamlayıp 2006 yılında Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde lisans eğitimine başladı. 2010 yılında buradan başarıyla mezun olduktan sonra Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat ve Konstrüksiyon programında yüksek lisansını sürdürürken Makine Mühendisliği bölümündeki görevine de devam etmektedir.