

Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi

Elif Nazik Atabay

DOKTORA TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2011

Evaluation of Hard Chrome Coating Alternatives in Aviation Industry

Elif Nazik Atabay

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Chemical Engineering

January-2011

Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi

Elif Nazik Atabay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı  
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalında  
**DOKTORA TEZİ**  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yard. Doç. Dr. Macid NURBAŞ

Ocak 2011

## ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Elif Nazik Atabay'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı ‘‘Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd.Doç.Dr. Macid NURBAş

**İkinci Danışman** : Yrd.Doç.Dr. Yeliz AşCI

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye:** Yrd.Doç.Dr. Macid NURBAş

**Üye:** Prof.Dr.Sermet KABASAKAL

**Üye:** Doç.Dr Hasan TUĞRUL

**Üye:** Yrd.Doç.Dr.Melih Cemal KUşHAN

**Üye:** Yrd.Doç.Dr.Alime ÇITAK

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

Prof.Dr.Nimetullah BURNAK  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Krom kaplama; havacılık, otomotiv ve petrokimya alanlarında yüksek sertlik, aşınma, korozyon dayanımı ve düşük sürtünme katsayısı elde etmek için en sık kullanılan elektrokaplama türüdür. Havacılıkta da başta hidrolikler, iniş takımları, dönen şaftlar, dişliler olmak üzere pek çok parçanın gerek imalinde gerekse tamir işlemlerinde kullanılır. Bu tez çalışmasında; krom kaplama alternatifi olarak literatürde geçen akımsız nikel ve termal sprey kaplamalar ile bu kaplamaların özelliklerinde iyileştirme sağlamak amacıyla modifikasyonlar yapılmasıyla elde edilen kaplamaların yapısal, mekanik ve korozif özellikleri karşılaştırılmıştır.

Farklı kaplama ve modifikasyonların yapısal, mekanik ve korozif özellikler üzerindeki etkisi incelenerek, kıyaslama yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, pürüzlülük, sertlik ölçümleri, aşınma, tuz, elektrokimyasal ve daldırma testleri yapılmıştır.

Tez çalışmasının sonucunda, uygulanan modifikasyonlar ile plazma sprey kaplamaların özelliklerinde iyileşme görüldüğü ve akımsız nikel kaplamanın en önemli dezavantajlarından biri olan yeterince kalın uygulanamaması probleminde ilerleme sağlandığı görülmüştür. Değerlendirilen alternatif kaplama türleri arasında en olumlu sonuçlar, HVOF kaplamalarda elde edilmiştir.

Krom kaplama alternatifi seçilirken ana metal, çalışma koşulları, kaplamanın geometrisi vb. pek çok parametrenin göz önüne alınarak mevcut duruma yönelik çözümlenme yapılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sert krom kaplama, termal sprey, akımsız nikel, lazer sırlama, sertlik, aşınma, korozyon.

## SUMMARY

Chromium plating is the most widely used electrodeposited coating to obtain high levels of hardness, resistance to wear and corrosion and a low friction coefficient for applications in the aerospace, automotive and petrochemical fields. Chrome coating is applied to many materials in the aviation industry; e.g. hydraulics, landing gear, rotating shafts and gears, both for manufacturing and maintaining processes.

In this dissertation, electroless nickel and thermal spray coatings, which are referred as the alternative coating processes for the chromium plating were evaluated. Some modifications such as double coating and laser glazing were applied to the samples in order to improve the structural, mechanical and corrosive properties of the mentioned chrome plating alternatives.

Roughness, hardness, wear, salt spray, electrochemical and immersion tests were applied to the coated and modified samples in order to make a good comparison in terms of structural, mechanical and corrosive properties.

During the experimental procedure, considerable improvements in the properties of plasma spray coatings were observed after the modifications. Likewise, improvements on the possible coating thickness limitation, which is the biggest disadvantage of the electroless nickel coating, were achieved as well. Among all studied chromium coating alternatives, the best results were obtained with HVOF coatings.

For the best decision on the alternative coating type, parameters like substrate metal, service conditions and coating geometry must be considered in detail.

**Keywords:** Hard chrome plating, electroless nickel, laser glazing, hardness, wear, corrosion.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, bu tezin oluşum ve yönetim aşamalarında yardım ve desteklerini esirgmeden, çalışmalarımnda her türlü olanağı sağlayan danışmanım Yrd.Doç.Dr. Macid NURBAŞ'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez jürisinde yer alan Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal KUŞHAN ve Prof. Dr. Sermet KABASAKAL'a tezimin tüm aşamalarında beni yönlendirerek destekledikleri için teşekkürü borç bilirim.

Çalışmamın tüm aşamalarında büyük destek ve yardımlarını gördüğüm çalışma arkadaşım Fehmi DİLTEMİZ'e, korozyon deneylerim esnasında bilgi ve laboratuvar olanakları konusunda her türlü desteğini bana sunan Doç.Dr. Mustafa ANIK'a, tez jürisinde yer alan Doç. Dr. Hasan TUĞRUL ve Yrd. Doç. Dr. Alime ÇITAK'a, ikinci danışmanım Yrd.Doç.Dr. Yeliz AŞÇI'ya, bana yardımcı olabilmek adına fedakarca saatlerini harcayan çalışma arkadaşlarım Önder SAVAŞ, Ömer GÜLTEN, Fikri SELEK, Hakan TOKSOY, Alper EKİNCİ, Yalçın EREN ve Selahattin KISALAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu yoğun süreçte desteklerini her zaman yanında hissettiğim eşim Mehmet Şakir DURUL, annem Nebahat ATABAY ve kızım Dilay DURUL'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET .....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>xii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xvi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KROM KAPLAMA VE ALTERNATİFLERİ .....</b>	<b>4</b>
2.1. Krom Kaplama .....	4
2.2. Akımsız Nikel Kaplama.....	12
2.2.1. Akımsız nikel-fosfor kaplamaların özellikleri.....	15
2.2.1.1. Yapı .....	16
2.2.1.2. İç stresler .....	17
2.2.1.3. Üniformalık .....	17
2.2.1.4. Tutunma .....	18
2.2.1.5. Fiziksel özellikler .....	18
2.2.1.6. Mekanik özellikler .....	19
2.2.1.7. Sürtünme özellikleri .....	19
2.2.1.8. Sertlik ve aşınma dayanımı .....	20
2.2.1.9. Korozyon dayanımı .....	21
2.3. Termal Sprey.....	23
2.3.1. Alev sprej.....	30
2.3.2. Elektrik ark sprej .....	30
2.3.3. Plazma sprej .....	31
2.3.4. Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) püskürtme .....	33



## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4. Krom Kaplama Alternatifleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	35
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>45</b>
3.1. Ana Malzeme Seçimi.....	46
3.2. Uygulanan Kaplamalar .....	46
3.2.1. Krom kaplama .....	47
3.2.2. Akımsız nikel kaplama.....	47
3.2.3. Termal spre y kaplamalar .....	48
3.3. Kaplamalara Uygulanan Modifikasyonlar.....	51
3.3.1. Nikel kaplama üzerine kombinasyon kaplama (codep) uygulaması	51
3.3.2. Spre y kaplamalara bilyeli dövme uygulaması.....	51
3.3.3. Termal spre y kaplamalara karbürizasyon uygulaması.....	52
3.3.4. Termal spre y kaplamaların üzerine akımsız nikel uygulaması .....	52
3.3.5. Termal spre y kaplamalara lazer sırlama (glazing) uygulaması .....	52
3.4. Yapılan testler .....	53
3.4.1. Görünüş ve yapışma .....	53
3.4.2. Yüzey pürüzlülüğü .....	54
3.4.3. Kalınlık.....	54
3.4.4. Sertlik .....	54
3.4.5. Çekme testi .....	55
3.4.6. Mikro yapı analizleri .....	55
3.4.7. Aşınma testi .....	56
3.4.8. Korozyon Testleri .....	57
3.4.8.1. Elektrolitik korozyon testi .....	57
3.4.8.2. Daldırma testi .....	58
3.4.8.3. Tuz testi.....	59

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
<b>4. DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>61</b>
4.1. Uygulanan Kaplamalar .....	61
4.2. Kaplamalara Uygulanan Modifikasyonlar.....	62
4.2.1. Nikel kaplama üzerine codep uygulamasının değerlendirilmesi ..	62
4.2.2. Sprey kaplamalara bilyeli dövme uygulamasının değerlendirilmesi	63
4.2.3. Sprey kaplamalara karbürizasyon uygulamasının değerlendirilmesi	64
4.2.4. Sprey kaplamalar üzerine akımsız nikel uygulamasının .....	65
değerlendirilmesi	
4.2.5. Sprey kaplamalara lazer sırlama uygulamasının değerlendirilmesi	66
4.3. Test Sonuçları.....	67
4.3.1. Görünüş ve yapışma .....	67
4.3.2. Yüzey pürüzlülüğü .....	67
4.3.3. Kalınlık.....	68
4.3.4. Sertlik .....	70
4.3.5. Çekme Testi.....	71
4.3.6. Mikroyapı Analizi .....	72
4.3.7. Aşınma Testi.....	80
4.3.8. Korozyon Testleri .....	90
4.3.8.1. Elektrolitik korozyon testi .....	90
4.3.8.2. Daldırma testi .....	94
4.3.8.3. Tuz testi .....	97
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>104</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>108</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>113</b>

**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa****EKLER .....**

Ek 1. Her 1000 Çevrimde ki Ağırlık Kaybı Değerleri, g (g/1000)

Ek 2. Toplam Ağırlık Kaybı Değerleri (g)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. % 10 P içeren kaplamada yükselen sıcaklığın sertlik üzerindeki etkisi (Baudrand, 1994).....	20
Şekil 2.2. Termal sprej kaplamanın oluşumu (Kaptan, 2010) .....	24
Şekil 2.3. Farklı işlemler görmüş termal sprej tozlarına ait SEM görüntüleri: a) gaz atomize, b) gözenekli kaplama, c) su atomize, d) ergimiş, e) sinterlenmiş, f) aglomere edilmiş – sinterlenmiş, g) yoğun kaplama (Amperit, 2010).....	26
Şekil 2.4. Bir uçak motoru parçasına termal sprej uygulaması (Yüksek vd., 2006)	28
Şekil 2.5. Plazma sprej tabancasının kesiti ve plazma oluşumu (Yüksek vd., 2006).....	32
Şekil 2.6. Plazma sistemi (Sulzer Metco, 2010).....	33
Şekil 2.7. Yüksek hızlı oksijen yakıt sistemi (Sulzer Metco, 2010).....	34
Şekil 2.8. İniş takımı iç silindirine, HVOF kaplama uygulaması (Sartwell and Legg, 2004).....	35
Şekil 3.1. Portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı .....	54
Şekil 3.2. Çekme numunelerinin: a) deney öncesi, b) deney sonrası görüntüleri...	55
Şekil 3.3. Nikon Optiphot 100 model optik mikroskop .....	56
Şekil 3.4. Taber 5131 aşınma test cihazı.....	57
Şekil 3.5. Galvanostat/potansiyostat.....	58
Şekil 3.6. Tuz test cihazı: a) dıştan görünüm, b) tuz sisi, c) içerisinde test kuponları.....	59
Şekil 4.1. Kaplamalı test kuponları: a) Elektrolitik krom, b) Tribaloy 400, c) krom karbür (2,5 x 10 cm boyutlarında) .....	62
Şekil 4.2. Codep uygulanmış akımsız nikel kaplamalı kuponlar .....	63
Şekil 4.3. Bilyeli dövme uygulanmış kuponların mikro yapıları: a) Alüminyum oksit, b) Tribaloy 400, c) tungsten karbür, d) krom karbür.....	64
Şekil 4.4. Karbürizasyon uygulanmış Tribaloy 400 kuponunun mikro yapı resmi.	65
Şekil 4.5. Akımsız nikel uygulanmış: a) alüminyum oksit, b) Tribaloy 400 ve c) 400 <sup>0</sup> C’de 1 saat ısıl işlem uygulanmış krom karbür kuponları.....	65

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 4.6. Tribaloy 400 lazer sırlama: a) uygulanmış, b) uygulanmamış.....	66
Şekil 4.7. Elektrolitik krom 200X büyütme .....	72
Şekil 4.8. Akımsız nikel: a) 100X ve b) 500X büyütme .....	73
Şekil 4.9. Alüminyum oksit: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	73
Şekil 4.10. Tribaloy 400: a) 200X ve b) 500X büyütme.....	74
Şekil 4.11. Tungsten karbür: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	74
Şekil 4.12. Krom karbür: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	75
Şekil 4.13. Tungsten karbür HVOF: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	76
Şekil 4.14. Alüminyum oksit üzeri akımsız nikel: a) 200X ve b) 500X büyütme....	76
Şekil 4.15. Tribaloy 400 üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme	77
Şekil 4.16. Tungsten karbür üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	77
Şekil 4.17. Krom karbür üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme.....	78
Şekil 4.18. Alüminyum oksit: a) akımsız nikel uygulanmış 100X, b) modifikasyonsuz 200X.....	78
Şekil 4.19. Tribaloy 400: a) akımsız nikel uygulanmış 200X, b) modifikasyonsuz 200X, c) lazer sırlama yapılmış.....	79
Şekil 4.20. Tungsten karbür: a) akımsız nikel uygulanmış 200X, b) modifikasyonsuz 200X.....	79
Şekil 4.21. Krom karbür: a) akımsız nikel uygulanmış 200X, b) modifikasyonsuz 200X.....	80
Şekil 4.22. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış krom kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü.....	81
Şekil 4.23. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış alüminyum oksit kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü.....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.24. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış Tribaloy 400 kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü.....	82
Şekil 4.25. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış tungsten karbür kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü.....	82
Şekil 4.26. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış krom karbür kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü.....	83
Şekil 4.27. Tüm gruplar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g.....	84
Şekil 4.28. Tüm gruplar için g olarak toplam ağırlık kaybı değerleri.....	84
Şekil 4.29. Tüm gruplar için g olarak ortalama ağırlık kaybı değerleri.....	85
Şekil 4.30. Krom, akımsız nikel ve HVOF kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g.....	86
Şekil 4.31. Krom, akımsız nikel ve üzerine akımsız nikel uygulanmış termal sprej kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g.....	87
Şekil 4.32. Akımsız nikel uygulanmış (19AN) ve uygulanmamış (19) alüminyum oksit kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g.....	88
Şekil 4.33. Akımsız nikel (36AN), lazer sırlama (36L) uygulanmış ve modifikasyon yapılmamış T400 için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g	88
Şekil 4.34. Akımsız nikel uygulanmış (37AN) ve uygulanmamış (37) tungsten karbür kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g	89
Şekil 4.35. Akımsız nikel uygulanmış (38AN) ve uygulanmamış (38) krom karbür kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g	89
Şekil 4.36. Krom, akımsız nikel ve termal sprej kaplamalar (19, 36, 37, 38, HVOF) için akım potansiyel eğrisi.....	92
Şekil 4.37. Krom, akımsız nikel ve HVOF termal sprej kaplamalar için akım potansiyel eğrisi.....	93
Şekil 4.38. Akımsız nikel ve akımsız nikel kaplanmış termal sprej numuneleri (19, 36, 37, 38) için akım potansiyel eğrisi.....	94
Şekil 4.39. Tüm numuneler için 24 ve 168 saat sonrasında korozyon hızları.....	95

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.40. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş alüminyum oksit kaplamalı kuponlar.....	99
Şekil 4.41. 100 saat tuz testi sonrasında alüminyum oksit kaplamalı kupon.....	99
Şekil 4.42. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş Tribaloy 400 kaplamalı kuponlar	100
Şekil 4.43. 100 saat tuz testi sonrasında Tribaloy 400 kaplamalı kupon.....	100
Şekil 4.44. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş tungsten karbür kaplamalı kuponlar.....	101
Şekil 4.45. 100 saat tuz testi sonrasında tungsten karbür kaplamalı kupon.....	101
Şekil 4.46. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş krom karbür kaplamalı kuponlar	102
Şekil 4.47. 100 saat tuz testi sonrasında krom karbür kaplamalı kupon.....	102
Şekil 4.48. 100 saat tuz testi sonrasında alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür ve krom kaplamalı kuponlar.....	103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Farklı mühendislik kaplamalarının Taber abraser dayanımlarının kıyaslanması (Baudrand, 1994).....	21
Çizelge 2.2. %10,5 P içeren akımsız nikel kaplamaların %10 hidroklorik asit solüsyonunda korozyonuna ısı işlemin etkisi (Baudrand, 1994).....	23
Çizelge 3.1. A286'nın kompozisyonu (Azomaterials, 2010 a).....	46
Çizelge 3.2. Sert krom kaplama parametreleri.....	47
Çizelge 3.3. Akımsız nikel kaplama parametreleri .....	48
Çizelge 3.4. Kaplama tozlarının özellikleri .....	49
Çizelge 3.5. Plazma sprej proses parametreleri .....	50
Çizelge 3.6. Yüksek hızlı oksijen yakıt sprej proses parametreleri .....	51
Çizelge 4.1. Numuneler için pürüzlülük ölçüm değerleri.....	67
Çizelge 4.2. Numuneler için kaplama kalınlıkları.....	69
Çizelge 4.3. Tüm test kuponları için sertlik değerleri.....	71
Çizelge 4.4. Krom ve termal sprej kaplamalar için çekme değerleri.....	72
Çizelge 4.5. 0.1 N HCl çözeltisindeki korozyon akım değerleri.....	91
Çizelge 4.6. 1 N HCl çözeltisindeki ağırlık kaybı ve korozyon hızı değerleri.....	96



**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Kısaltmalar Açıklama**

AMS	Havacılık malzeme spesifikasyonları (Aerospace materials specifications)
AN	Akımsız nikel
APS	Atmosferik plazma sprey
ASTM	Amerikan malzemeler ve testleri birliği (American society for testing and materials)
CODEP	Kombinasyon kaplama (co-deposition)
GPH	Galon / saat (Gallons per hour)
HVOF	Yüksek hızlı oksijen yakıt sprey
K	Sert krom
SCFH	Feet <sup>3</sup> / saat (Standard cubic feet per hour)

## 1. GİRİŞ

Depozit kaplamalar; havacılık, otomotiv, petrokimya endüstrilerini de içeren geniş ve önemli bir endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Krom kaplama, yüksek sertliği, korozyon ve aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı ile en yaygın kullanımı olan elektrokaplama türüdür. Diğer taraftan, çevresel gereksinimler, ana metalin yorulma dayanımının azalması, yapıdaki mikroçatlaklardan kaynaklanan düşük korozyon dayanımı, eş dağılım göstermeyen kaplama kalınlığı, yüksek enerji tüketimi gibi dezavantajlar ile bağlantılı olarak alternatif proses, malzeme ve yeni dizaynlar üzerinde çalışılmaktadır. Ayrıca krom kaplamanın oldukça yavaş ilerleyen bir proses olması da (tipik kaplama hızı 0,001 inç/saat) daha hızlı alternatifler arayışını beraberinde getirmiştir.

Alternatif kaplama prosesleri arasında +3 değerlikli krom, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamalar, nikel-tungsten kompozit kaplamalar, termal sprej teknikleri, vakum kaplama prosesleri verilebilir.

Akımsız nikel kaplamalar mükemmel üniformluk, düzgün olmayan yüzeylere dahi eş kalınlıkta ve çözelti ile temas eden her bölgede kaplanabilme, yüksek aşınma ve korozyon dayanımı özelliklerine sahiptir. Ni-P ve Ni-B alaşım kaplamalarında kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirmenin en etkili yolu akımsız nikel çoklu alaşımlardır. İlave elementin seçimi kaplamanın kazanması istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklere bağlıdır. Örneğin kobalt ve demir kaplamaya manyetik özellikler kazandırmak için kullanılır (Azizi et al, 2010).

Termal sprej kaplamalar, alev sprej, elektrik ark sprej, plazma sprej, yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (HVOF) vb. yöntemlerle uygulanabilmektedir. Ancak özellikle HVOF termal sprej kaplamalar, yüksek yoğunluk ve düşük poroziteye sahip kaplamalar olmaları gibi nedenlerle krom kaplama alternatifi olarak öne çıkmaktadır.

Tüm termal sprej kaplama metotlarında kaplamanın özellikleri ve performansı kaplama malzemesi ve kaplama parametrelerine bağlıdır. Optimum kaplama özellikleri, kritik kaplama parametrelerinin uygun aralıkta uygulanmasıyla elde edilir. Özellikle plazma sprej ve HVOF proseslerinde çok fazla değişken parametre olduğundan optimum özelliklerde kaplamayı elde etmek zordur (Sartwell and Legg, 2004).

Bu tez çalışması kapsamında, krom kaplama alternatiflerinin incelemesi yapılarak, bu alternatiflerin hâlihazırda krom kaplama uygulanan bir uçak motor parçası ana malzemesi olan A286 test kuponlarına uygulanmasıyla alternatif kaplamaların ve sert krom kaplamanın seçilen malzemeler üzerindeki yapısal, mekanik ve korozif özelliklerinin karşılaştırmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Krom kaplama alternatifi olarak literatürde geçen akımsız nikel, plazma sprej ve HVOF kaplamalar test kuponlarına uygulanmış ve bu kaplamaların olumsuz özelliklerini iyileştirmek için ne gibi modifikasyonların yapılabileceği incelenerek, uygulanan bu modifikasyonların sonunda elde edilen özellikler kıyaslanmıştır.

Krom kaplama alternatifleri ile ilgili çalışmada HVOF sprej kaplamaların yanı sıra, plazma sprej kaplamalar ile de çalışılmıştır. Plazma sprej kaplamalar, HVOF sprej kaplamalara kıyasla daha yaygın olarak kullanılmaktadır ve daha düşük maliyetlidir. Ayrıca motor üreticileri, genellikle gaz türbin motorlarındaki dönen parçalarda kaplama sökümündeki güçlükler nedeniyle (çoğunlukla elektrolitik proses kullanılması gerekir) HVOF kaplama kullanımını tercih etmemektedir. Plazma sprej kaplamalar yüksek basınç su jeti gibi elektrolitik olmayan proseslerle kolaylıkla sökülebilmektedir (Sartwell and Legg, 2004).

Tez çalışmasında kullanılan A286, demir esaslı bir süper alaşımdır. Test kuponlarına;

- Elektrolitik krom,
- Akımsız nikel,

- Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ , %3  $TiO_2$ ) plazma sprej,
- Tribaloy 400 (Co-28Mo-8Cr-2Si) plazma sprej,
- Tungsten karbür (WC-%12Co) plazma sprej,
- Krom karbür (%75  $Cr_3C_2$ , %20 Ni, %5 krom tozu) plazma sprej,
- Tungsten karbür (WC-10Co-4Cr) HVOF kaplamaları uygulanmıştır.

Ayrıca plazma sprej (alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür) üzerine akımsız nikel kaplanması ve Tribaloy 400'ün lazerle sırlanması modifikasyonları gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan kaplamaların özellikle aşınma ve korozyon özellikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için aşağıdaki testler yapılmıştır:

- Görünüş ve yapışma,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Kalınlık,
- Mikrosertlik,
- Çekme testi,
- Mikroyapı analizi,
- Aşınma testi,
- 0,1 N HCl içerisinde elektrolitik korozyon testleri,
- 1 N HCl içerisinde daldırma testi,
- Tuz testi.

Yapılan testler sonucunda farklı kaplama türlerinin ve bu kaplamalara uygulanan modifikasyonların aşınma ve korozyon dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve krom kaplama ile kıyaslanmıştır. Krom kaplama alternatifi olarak hangi koşullarda hangi kaplamaların uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

## 2. KROM KAPLAMA VE ALTERNATİFLERİ

Bu bölümde krom kaplama ve alternatifi olarak üzerinde çalışılan akımsız nikel ve termal sprej kaplamalar hakkında bilgi verilmiştir.

### 2.1. Krom Kaplama

Krom, malzemeye kattığı üstün özellikleri, yaygın olarak bilinen prosesleri ve maliyet verimliliği nedeniyle metallerin yüzey işlemlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Yüzey işlemleri kapsamındaki en önemli kullanım alanları krom ve kromat dönüşüm kaplamalarıdır. Çelik malzemelere elektrolitik olarak tatbik edilen krom kaplama, yüksek aşınma direnci ve yüzey dayanımı amacıyla sert krom kaplama veya nispeten ince tabaka halinde estetik amaçlı olarak dekoratif kaplama şeklinde uygulanmaktadır. Kromat dönüşüm kaplama; alüminyum, magnezyum, kadmiyum kaplama ve alaşımları üzerine korozyon dayanımı ve/veya boya altı olarak uygulanan elektrolitik olmayan bir prosestir. Daha seyrek olarak ta krom, kromik asit anodize işlemi ile alüminyum parçalara korozyon dayanımı ve boya yapışma özellikleri sağlamak için elektrolitik bir prosesle uygulanır. Krom yüzey işlemlerinde en yaygın olarak sert krom kaplamalar kullanılır. Yeni ya da tamiri yapılan parçalarda, sert ve aşınma dayanımı olan kaplamalara gereksinim duyulan uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Sert krom kaplama, kromik asit ( $CrO_3$ ) ve uygun oranda katalitik anyon içeren bir solüsyondan elektrokaplama ile elde edilir. Nihai kaplama, son derece serttir ve korozyona karşı dayanıklıdır (Meyers and Lynn, 1994; Newby, 1994).

Sert krom kaplamanın temel kullanım alanları, aşınma direnci uygulamaları, takım-alet performansının ve ömrünün geliştirilmesi ve parça kurtarılmasıdır. Aşınma amacıyla kullanımına örnek olarak piston halkalarındaki kullanımı verilebilir. Krom kaplamalı piston halkaların ortalama ömrü, aynı ana metalden olup kaplanmamış olanlara kıyasla beş kat daha fazladır. Otomotiv endüstrisinde, aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak üzere şok absorbe edici çubuk ve desteklere de uygulanır. Valf

gövdeleri aşınmayı önlemek için yaklaşık 2,5 µm, hidrolik şaftlar servis ömrünü arttırmak amacıyla 20–30 µm kalınlığında kaplanır. Takım alet uygulamalarında ise, aşınmayı minimize etmek, ölçüden düşmeyi ve sürtünmeyi önlemek, sürtünmeyi azaltmak ve/veya korozyonu minimize etmek için krom kaplanır. Plastiklerin kalıplanması amacıyla kullanılan çelik veya berilyum bakır kalıplar da krom ile kaplanır. Sert krom kaplama, bazen yanlış makinelenemiş ya da aşınmış yüzeylerin tamirinde de kullanılır; örneğin dizel ve gaz motorlarının kompresörlerindeki krank şaftlarının aşınmış yüzeyleri orijinal ölçülerine getirilir (Newby, 1994).

Havacılık uygulamalarında krom kaplamalar, hidroliklerin, iniş takımlarının, dönen şaftların, dişlilerin ve kayma ya da dönme hareketine maruz kalan yüzeylerin aşınmaya dayanıklı kaplamalarında tercih edilir. İniş takımı ve hidrolik hareket mekanizması parçaları, krom kaplamaların en yoğun kullanıldığı bölgelerin başında yer alır. Bazı uygulamalarda, özellikle şaft ve yatak tutucularda yüzeylerin birbirine oturması ve asambledeki sürtünmenin azaltılması için kullanılır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda krom kaplamanın yüzeyi, daha iyi yüzey özellikleri ve daha doğru boyutları elde etmek için taşlanır. Aynı zamanda yanlış makinelenemiş parçalarda boyutları eski haline getirmek içinde krom kaplama kullanılır. Orijinal üreticilerin krom kaplama kullanımı oldukça ince bir tabaka halindedir. Dış hidrolik silindirlerin iç çapları gibi korozyon dayanımının istendiği ve aşınmanın önemli olmadığı yerlerde 0,0003" kalınlığında (tipik kullanım) kullanılır. Revizyon ve tamir işlemleri süresince aşınmış, oyuklanmış ya da spesifikasyonunun dışına çıkmış orijinali krom kaplamalı olan ya da olmayan parçaların tamir işlemlerinde kullanılır. Pek çok bakım atölyesinde sert krom kaplama tankları vardır. Tamir esnasındaki kullanımı orijinal ekipman üreticilerinin kullanımından daha yaygın ve daha kalındır (0.010" – 0.020") (Legg and Sauer, 2000; Meyers and Lynn, 1994).

Sert krom kaplama, endüstriyel, fonksiyonel ya da mühendislik krom kaplaması olarak da adlandırılır. Banyo sıcaklığı ve akım yoğunluğu değiştirilerek aynı banyo içerisinde dekoratif ve sert krom kaplamalar uygulanabilir. Sert ve dekoratif krom kaplamaların farkları aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir:

- Sert krom kaplama, öncelikle yüzeyde aşınmaya, aşındırıcılara, yağlanma aşınmasına ve korozyona dayanım veren düşük sürtünme katsayısı sağlayarak fonksiyonel parçaların servis ömrünü arttırmak için uygulanır. Diğer önemli bir amacı da boyutları limit dışı olan parçaları ölçüye getirmektir. Dekoratif krom kaplama ise daha çok parlak ve estetik bir görünümün tercih edildiği yerlerde kullanılır.
- Sert krom, normalde 2,5–500 µm kalınlığında, bazı uygulamalarda daha da kalın olarak uygulanır. Dekoratif kaplamalar ise nadiren 1,3 µm'yi aşar.
- Belirli istisnalar dışında sert krom kaplama direk olarak ana metale uygulanır, dekoratif krom ise bakır-nikel ve nikel kaplamaların üzerine uygulanır (Berk, 2004; Meyers and Lynn, 1994; Newby, 1994; Plating Resources, 2010).

Sert krom kaplama solüsyonlarında metalin kaynağı kromik asittir. Bununla birlikte, katalizör olarak davranan ve kromun katodik birikimine yardımcı olan belirli bir miktarda asit bulunmadıkça krom kaplanamaz. Katalizörler asit anyonlarını sağlar; ilk olarak kullanılanı sülfattır. Sülfat yerine kompleks asit radikallerinin içinde bulunan flor iyonlarının kullanılması krom kaplama süreçlerini geliştirmiştir. 1980'lerin sonlarında ise florsuz solüsyonlar geliştirilmiştir. Kaplamanın sertliği ve korozyon dayanımı, konvansiyonel sülfat solüsyonundan katalizör karışımı solüsyonu ve florsuz solüsyona geçtikçe giderek artmıştır. Her üç tip içinde üretim hızına bağlı olarak solüsyon kontrolü için periyodik kimyasal analizler yapılmalıdır (Newby, 1994; Plating Resources, 2010).

Elektrolitik kaplamanın kalitesi üzerine etki eden başlıca faktörler; akım yoğunluğu, konsantrasyon ve karıştırma, sıcaklık, ana metalin ve elektrolitin doğası, pH ve kaplama gücüdür:

- Akım yoğunluğu: Elektrotların birim yüzeyine isabet eden akım şiddetidir [ $A/dm^2$ ]. Akım yoğunluğu arttığında kristallerin oluşum hızı arttığından ince taneli kristaller oluşur. Daha da artarsa katot yüzeyinde deşarj olan metal iyonları çözelti içinden gelenlerle yeterince karşılanamadığından katotta bir

fakirleşme meydana gelir. Bunun sonucu homojen olmayan, siyah ve süngerimsi bir kaplama oluşur.

- Konsantrasyon ve karıştırma: Düşük konsantrasyonda ince taneli yüksek konsantrasyonda ise daha iri taneli kristaller oluşur. Katottaki yerel fakirleşmeyi karşılamak amacıyla elektrolite ya da katoda hareket verilebilir. Ayrıca banyonun belli periyotlarda filtre edilmesi faydalıdır.
- Sıcaklık: İki karşıt etkisi vardır; difüzyonu artırarak küçük kristalli yapıların, diğer taraftan da katot polarizasyonunu azaltarak büyük kristallerin oluşumuna neden olur. Her banyonun belirli çalışma sıcaklığı vardır.
- Ana malzeme ve elektrolit: Ana metalin özellikleri ve parçanın daha önceki üretim aşamaları kaplama kalitesini etkiler. Kompleks tuzların elektroliziyle elde edilen kaplamalar, normal tuzlarla elde edilenlerden daha üstündür. Ayrıca elektroliti hazırlarken kullanılacak su da çok önemlidir, yüksek sertlikteki sular kullanılmamalı deiyonize su tercih edilmelidir.
- pH: Elektrolitlerin belirtilen pH değerlerinin altında veya üstünde olması kaplama kalitesini bozacaktır. Kaplama hatlarında, alkali banyolardan asit kaplamalara geçerken nötrleme gibi pH değerini etkileyecek faktörlere çok dikkat edilmelidir.
- Kaplama gücü: Elektrolitik kaplamada, kaplamanın sadece görünümünün ve özelliklerinin istenen şekilde olması yeterli değildir. Aynı zamanda kaplamanın, malzemenin tüm yüzeyinde aynı kalınlıkta olması istenir. Düzgün olmayan bir malzeme üzerinde oldukça düzgün bir kaplama elde edilmesi için çözeltinin gösterdiği özelliğe dağılma veya kaplama gücü denir. Düzgün yüzeyli olmayan bir parçanın anoda yakın kısımları uzaktakilere göre daha kalın bir tabaka ile kaplanır. Çözelti iletkenliği ile polarizasyon doğru orantılıdır; yani iletkenliği fazla olan elektrolitlerde kaplama gücü fazladır. Sıcaklık artışı iletkenliği arttırırsa da, polarizasyonu daha fazla arttıracağından kaplama gücünü azaltmış olur (Berk, 2004; Evcin, 2006; Meyers and Lynn, 1994).

Krom kaplama prosesi, işlem öncesinde yağ alma, maskeleme ve temizleme adımlarını içerir. Parçalar askıya asılarak istenilen kalınlığa göre 24 saate kadar



kaplama banyosuna daldırılır. Parçalar banyodan çıkarıldıktan sonra maske sökülür, fırınlanarak gevreklik giderme işlemi ve sonrasında son yüzey işlemi (taşlama, laping, parlatma vb.) yapılarak kaplama prosesi tamamlanır. Krom kaplama prosesinde yüzey hazırlama önemli bir işlem adımıdır ve aşamaları doğru olarak uygulandığında, zayıf olan metalin mukavemetinden daha yüksek bir bağ mukavemeti elde edilebilmektedir. Kaplamanın ana metale iyi yapışabilmesi için yüzeyin son derece temiz olması, her hangi bir film veya oksit tabakası içermemesi gerekmektedir. Temizlemeye ilaveten sert krom kaplama için bazı yüzey aktifleştirme proseslerinin uygulanması da ana metalin hazırlanması açısından önemlidir. Proses, çeliklerin dağlanması, ön kaplama makinelemesi ve demirli olmayan metallerin hazırlanması aşamalarını içerir. Çeliğin kaplama öncesinde dağlanması, krom kaplamanın yapışmasından emin olmak için gereklidir ve bu amaçla anodik dağlama tercih edilir. Alüminyum hazırlamak için zinkatlama, titanyum alaşımları, magnezyum gibi sıkı, stabil oksit katmanına sahip malzemeler içinse akımsız nikel solüsyonu ile ön işlem yapılmaktadır. Hidrolik sıvı ya da benzer koruyucu akışkanlara maruz kalan kaplamalı yüzeyleri korozyondan korumak için nikel alt kaplama da uygulanmaktadır. Bir diğer husus da; kaplamalar nispeten kalın olduğundan, kaplama yüzeyinin pürüzlü, kaba yapıda olmamasına dikkat edilmesi gereğidir. Pürüzlü yapı, kaplama sonrası yapılacak taşlama ve laping işçiliğinin artmasına, dolayısı ile maliyetin artmasına yol açacaktır (Evcin, 2006; Meyers and Lynn, 1994; Newby, 1994; Yuzeyislemeler.com, 2010).

Krom kaplamanın bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir:

Avantajları:

- Parlaklığı (serviste olduğu sürece de parlaklığını koruyabilmesi),
- Mükemmel yüzey düzgünlüğü,
- Sağlamlığı,
- Sertliği (700 – 1000 HV),
- Aşınma dayanımı,
- Korozyon dayanımı,
- Düşük sürtünme katsayısı,
- Düşük maliyet,

- İyi bilinmesi (yıllardır yaygın bir şekilde kullanılması),
- Uygulamasının kolay olması,

Dezavantajları:

- Yorulma ömrünün azalması,
- Mikroçatlaklardan dolayı azalan korozyon dayanımı,
- Yüksek güç tüketimi,
- Üniform olmayan kaplama,
- Delik ve boru içlerine zayıf nüfuziyet,
- Proseste hidrojen oluşması,
- Buharlaştırma şeklinde meydana gelen hidrojen oluşumu sonucunda yüksek emisyon, sağlık, güvenlik ve çevresel risklerinin ortaya çıkması,
- Lehimlenememesi,
- Yapışma kabiliyetinin az olması (uygun olmayan ön hazırlama işlemleri ve kaplama boyunca uzanan çok sayıda mikroçatlaklardan dolayı),
- Uygun olmayan kaplama gücü ve üniform olmayan kaplama ile sonuçlanan düşük katot etkinliği,
- +6 değerli kromun toksik ve kanserojen olması (Azomaterials, 2010 b; Meyers and Lynn, 1994; Ünver, 2010; Wikipedia, 2010)

Krom kaplamanın sertliği seçilen kimyasalların tipi ve kaplama koşullarının fonksiyonudur. Genelde, krom kaplama parlak bölgede optimum sertliktedir. Konvansiyonel kaplama solüsyonları ile 850 – 950 HV, karışımli kataliz solüsyonları ile 900 – 1000 HV, florürsüz kimyasallarla 950 – 1100 HV ya da üstü değerlere ulaşılabilir. Elektrolitik krom kaplamanın aşınma dayanımını da kapsayan sertliği üzerinde sıcaklığın etkisi önemli bir faktördür. Elektro kaplanmış metal 205 °C'ın üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldığında sertliği azalmaya başlar. Artan sıcaklıkla beraber sertlik azalır. Krom kaplamanın sertliği azaldığında aşınma dayanımı da ters yönde etkilenebilir. Krom kaplama, 420°C'ın üzerinde ki servis sıcaklıklarında aşınma dayanımı için kullanılmamalıdır.

Sert krom kaplamanın kalitesi, kalınlık ve kalınlık dağılımı, görünüş, çatlak paterni, çatlak ölçüsü, porozite, pürüzlülük ve kaplamanın ana metale yapışması yönlerinden değerlendirilir. Krom kaplama kalınlığı ile ilgili değişkenler öncelikle potansiyel alan dağılımına bağlıdır. Potansiyel alanı tankın yüzeyinin ve kenarlarının relatif pozisyonu kadar anotların yeri, koruyucular ve diğer parçalar tarafından kontrol edilir. Kaplama kalınlığındaki değişimler ayrıca yüzey hazırlama, solüsyonun kontrol koşulları ve güç kaynağının üniformluğuna da bağlıdır. Genellikle sert krom kaplama yüzeyinin görünüş ve pürüzlülüğünü belirlemede gözle kontrol yeterlidir. 100 µm'ye kadar kalınlığı olan krom kaplamalı parçaları, taşlama sonrasında çatlaklar açısından kontrol etmek için manyetik parçacık kontrolü kullanılabilir. Kaplama, kaplama kalınlığı yönünden aşırı değişimler göstermemelidir. Çatlak paterni %50'lik sulu, sıcak hidroklorik asit solüsyonu ile ya da krom kaplama solüsyonunda kısa süreli dağlama ile ortaya çıkar.

Krom kaplama prosesi esnasında iç stresleri azaltmak için mikroçatlaklar oluşur. Bu çatlaklar sonrasında krom ile kaplanır, önceki çatlaklar daha kolaylıkla dağlanabilir ve çevresindeki kaplamadan farklı bir yansıtma indeksine sahiptir. Korozyon uygulamalarında, en çok sayıda mikroçatlağı sağlayan solüsyon kullanılır. Nikel ve kromun birlikte kaplanması durumunda nikel kaplama 20–30 µm arasında değişirken, parlak krom kaplama 0.2-0.25 µm lik çok ince bir tabaka halindedir. Krom tabaka kalınlığı arttıkça korozyona dayanıklılık gelişir. Korozi ortamda krom-nikel arasında doğan galvanik etki çok geniş bir alana yayıldığından korozyon etkisi azaltılmış olur. Çatlakların az olması, bu bölgelerde korozyonun yoğunlaşmasına yol açacağından daha tehlikeli bir durum yaratır. Krom kaplamayı hemen hemen hiç mikroçatlaksız yapmak mümkündür. Bu akım yoğunluğu ve sıcaklığı değiştirilerek, katalizör konsantrasyonunu değiştirilerek ya da darbeli akım ya da periyodik ters kaplamayla yapılır. Çatlaksız kaplama gri renklidir ve çok zayıf aşınma özelliklerine sahiptir. Korozyon dayanımı, kaplamanın içindeki iç streslerden dolayı çok zayıftır ki, bu iç stresler bir süre sonunda tüm kaplama boyunca uzanan geniş çatlaklara yol açar. Çatlaklar ya da poroziteler krom kaplama karakterizasyonunda korozyon dayanımı için istenirse de, gözenekli yapı yağlamanın gerektiği aşınma uygulamalarında avantaj olabilir. Islatma hareketini hızlandırır ve başlangıçtaki yağlamadan sonra yağın

kalmasını sağlar. Motor silindirleri, bu konudaki önemli bir uygulamadır. İki farklı tip gözenekli krom üretilir, ikisinde de porozite oranı toplam alanın %20-50'si arasında tutulur. %75 gibi yüksek porozite değerleri başlangıçta yüksek aşınma ve yüksek yağ tüketimine neden olur. Optimum porozitede kromla kaplı silindirler 1-3 ya da 1-10 oranlarında kaplamasız demir ya da çelikten daha iyi aşınma hızına sahiptirler (Newby, 1994; Çakır, 1990).

Krom kaplama işlemi sırasında katottan aşırı miktarda hidrojen gazı açığa çıkar; bu gaz karbürleşmiş ve yüksek dayanımlı çelikler başta olmak üzere, demir esaslı ana malzemelerde hidrojen gevrekliği (kırılganlığı) oluşumuna yol açar. Uygunsuz taşlamadan dolayı yüksek yüzey gerilimi, yüzeyin çapaklı kalması ve kaplamadan önce dağlama ve temizleme işlemlerinin iyi yapılmamış olması da hidrojen gevrekliğine yol açan, en sık karşılaşılan hatalardandır. Ayrıca katodik temizlemenin hiçbir türü uygulanmamalıdır. Genelde, sertliği Rockwell 40 C'den büyük olan çeliklerin hidrojen gevrekliğine olan hassasiyetleri, sertliği düşük olanlara göre yüksektir. Eğer krom kaplanacak yüzeylerde makineleme, taşlama ya da sertleştirme işlemleri ile stresler oluşmuşsa kaplama öncesinde gerilimini gidermek için tavlanmalıdır (ısıl işlem). Bu işlem, iş parçasının et kalınlığına göre belirlenen süre kadar, 150-230°C sıcaklıkta yapılır. Sertliği 40 HRC'yi aşan çelik parçalar kaplama işlemi sonrasında en azından 190°C'de 4 saat fırınlanarak hidrojen gevrekliğinin etkileri giderilmelidir. Bu işlem kaplama sonrasında mümkün olduğu kadar kısa sürede, tercihen 15 dakika sonrasında, yapılmalıdır. Farklı gerilimlere maruz kalacak parçaların yorulma dayanımı ısıl işlemlerle azaltılmalı ve böyle parçalara kaplama işlemi öncesinde bilyeli dövme yapılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da, kaplanacak iş parçasının et kalınlığıdır. Eğer kaplanacak iş parçası ince ise, yapılacak kaplamanın kalınlığı da bununla orantılı olarak, olabildiğince ince olmalıdır (eğer ince iş parçasının üzerine orantısız bir şekilde kalın kaplama yapılırsa kaplamadaki çatlak, ana metali de çatlatır ve malzemenin tamamen hasar görmesine yol açar) ( Newby, 1994; Yuzeyislemeler.com, 2010).

## 2.2. Akımsız Nikel Kaplama

Akımsız nikel kaplama, metal ya da metal olmayan bir iş parçasına nikel-fosfor ya da nikel-bor alaşımlarını kaplamak için kullanılan otokatalitik, kimyasal bir tekniktir. Katalitik etkisi olan metal yüzeyinde nikel iyonlarının bir indirgeyici etkisiyle redüklenerek nikel metaline dönüşmesi esasına dayanır, bu sırada açığa çıkan fosfor veya bor ile birleşen nikel bir alaşım oluşturur. İndirgenme süreci, kendisi de katalitik etki gösteren nikel üzerinde devam eder. Elektrolitik nikel kaplamadan farklı olarak elektrik akımı gerekli değildir (Çakır, 1989; Wikipedia, 2010).

Akımsız nikel, bir mühendislik kaplamasıdır; mükemmel korozyon ve aşınma dayanımı özelliklerinden dolayı kullanılır. Ayrıca lehmlenebilir bir yüzey sağlamak ve kalıplarda yağlanmayı ve parçanın serbestliğini geliştirmek için sıklıkla alüminyuma da uygulanır. Bu özelliklerinden dolayı akımsız nikel kaplama petrol, kimyasal, plastik, optik, baskı, maden, havacılık, nükleer, otomotiv, elektronik, bilgisayar, tekstil, kâğıt ve gıda makineleri gibi pek çok endüstride kullanım alanı bulmuştur. Havacılık ve uzay endüstrisinde ise iniş takımı parçaları, motor komponentleri, statorlar, aralayıcılar (spacers), hava kesiciler (air seals), pompalar, dikmeler, cayrolar, füze sistem parçaları, pistonlar, valf komponentleri, yataklar vb.de kullanılır (Alcrome Technologies, 2010; Baudrand, 1994).

Katalitik yüzey üzerinde nikel iyonlarının kontrollü kimyasal indirgenmesiyle elde edilen kaplamanın kendisinde indirgenme için katalitiktir ve yüzey akımsız nikel solüsyonu ile temas ettiği sürece reaksiyon devam eder. Elektrik akımı olmaksızın uygulandığı için kalınlığı taze solüsyonla temas eden tüm alanlarda üniformdur. Akımsız nikel solüsyonu her biri önemli bir fonksiyonu yerine getiren farklı kimyasalların karışımıdır ve solüsyon aşağıdakileri içerir:

- Bir nikel kaynağı (nikel sülfat, nikel klorür, nikel asetat vb.),
- Nikelin indirgenmesi için gerekli elektronları sağlayan indirgeyici ajan (sodyum hipofosfit, sodyum borhidrür, aminoborlar, hidrazin vb.),
- Enerji (ısı),

- Reaksiyonun serbest nikel mevcudiyetini kontrol etmek için kompleks oluşturucu ajan,
- Kaplama işlemi süresince oluşan hidrojenin yol açtığı pH değişimlerini ayarlamak için tampon ajan,
- Reaksiyonun hızının artmasına yardım etmek için hızlandırıcı,
- İndirgenmeyi kontrol etmek için inhibitör,
- Yan ürün reaksiyonları (Baudrand, 1994; Çakır, 1989).

Katalitik reaksiyonların belirli bir hızda ilerleyebilmesi için enerjiye gerek vardır. Enerji ya da ısı miktarı kaplamayı etkileyen en önemli değişkenlerden birisidir ve kaplama banyolarında enerji, çözeltinin ısıtılması ile sağlanır. Kabul edilebilir hızda kaplama 65 °C'den sonra elde edilir, uygulamada en yaygın kullanılan sıcaklık aralığı 85-95 °C'dir. Solüsyonunun aniden bozunmasını önlemek ve reaksiyonu kontrol ederek sadece katalitik yüzeyde gerçekleşmesini sağlamak için kompleks oluşturucu ajanlar ilave edilir. Kompleks oluşturucu maddelerin görevi akımsız nikel banyo çözeltisinin kendi kendine ayrışmasını engellemek ve indirgenmenin yalnız katalitik yüzey üzerinde meydana gelmesini sağlamaktır. Genelde serbest nikel miktarını ayarlayan organik asitler veya onların tuzlarından oluşur. Örneğin sodyum hipofosfit, banyolarda nikel fosfit çöküşünü ve indirgenme reaksiyonu ile üretilen hidrojen iyonlarıyla pH'ın hızlıca düşmesini engelleyerek banyoyu kararlı kılar. Hızlandırıcı olarak adlandırılan organik ilaveler ise kompleks oluşturucu ajanlarca ekonomik olmayan bir şekilde azaltılan bozunma hızını arttırmak için kaplama solüsyonuna ilave edilir. Hipofosfitli banyolarda hızlandırıcıların, hidrojen ve fosfor atomları arasındaki bağı gevşeterek molekülün daha kolay hareket etmesine ve katalitik yüzeye absorbe olmasına yol açtığı düşünülmektedir. Akımsız nikel kaplama banyosunda indirgenme reaksiyonunun kontrol edilerek kaplamamanın tahmin edilebilir bir hızda ve sadece kaplanacak ana malzeme yüzeyinde gerçekleşmesini sağlamak ve solüsyonun ansızın bozunmasını önlemek için inhibitörler ilave edilir. Bozunma genellikle solüsyonun içinde koloidal katı parçacıkların bulunmasıyla başlar. Bu parçacıklar, yabancı bir malzemenin varlığının (toz ya da kumlama malzemesi) ya da banyodaki ortofosfit konsantrasyonunun çözünürlük limitlerini aşmasının sonucudur. Aniden bozunmayı

engellemek için iz miktarda inhibitör kullanımı dışında banyoların iyi bir şekilde kontrol ve filtre edilmesi ve karıştırılması da önemlidir. Akımsız nikel kaplama prosesi süresince oluşan yan ürünler banyonun performansını etkiler (Baudrand, 1994; Çakır, 1989).

Akımsız nikel kaplamanın yüzeye iyi yapışmasında yüzeyin iyice temizlenmesi ve uygun ön işlemlerin yapılması önemlidir. Uygun olmayan temizleme, son ısıl işlem esnasında kaplamanın pullanmasına ve kalkmalara yol açacaktır. Yüzey, temizlendikten sonra kaplama solüsyonuna daha reaktif olmasını sağlayacak şekilde aktive edilmelidir. Paslanmaz çelik gibi bazı pasif metallerde iyi yapışmanın sağlanabilmesi için aktivasyon sonrasında ilave işlemlerin yapılması gerekir (Bal Seal Engineering, 2010).

Akımsız nikelin bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir:

Avantajları:

- Yüksek aşınma dayanımı ve uygun ısıl işleme yüksek sertliklere erişebilen nitelikte olması,
- Mükemmel üniformalık, düzgün olmayan yüzeylere dahi eş kalınlıkta ve çözelti ile temas eden her bölgede kaplanabilmesi,
- Lehimlenebilirlik ve breyz yapılabilirlik (özellikle düşük fosforlu ve borlu kaplamalarda),
- Düşük iş maliyeti,
- Çok az gözenekli yapıda ve yüksek korozyon dirençli olması (elektrolitik nikel ve sert kromdan daha iyi),
- Benzerlerinden daha az hidrojen absorplaması (elektrolitik nikel kaplamanın yaklaşık beşte biri, elektrolitik sert kromunda yaklaşık onda biri oranlarında),
- Mikrosertlik değerinin uygun ısıl işlem ile 450-600 VHN'den 1000-1100 VHN'ye kadar yükselebilmesi,
- Kaplamanın doğasında yağlama özelliği bulunması,
- Yağlar için iyi ıslatılabilirlik özelliğinde olması,

- Metal veya metal olmayan yüzeylere dahi belirli bir ön işlemden sonra başarı ile kaplanabilmesi,
- Metalin açığa çıkması elektrik akımı gerektirmediği için akım kaynağına ve askı sistemine ihtiyaç göstermemesi,
- Mat, yarı parlak ve parlak yüzlerin elde edilebilmesidir.

Dezavantajları:

- Elektrokaplama daha fazla kimyasal kullanım ve arıtım maliyeti,
- Kırılganlık,
- Yüzey hazırlama ve kaplama solüsyonu için yüksek kalite kontrol gereksinimlerine ihtiyaç duyulması,
- Nikel kaplamanın nikel-fosfor birikintileri ile kirlenmesinden dolayı zayıf kaynak özellikleri,
- Önemli miktarda kurşun, kalay, kadmiyum ve çinko içeren bileşiklerin akımsız nikel uygulanmadan önce bakır ön kaplama uygulanmasına ihtiyaç duyulması,
- Elektrolitik metotlarla kıyaslandığında kaplama hızının daha düşük olmasıdır (Baudrand, 1994; Bal Seal Engineering, 2010; Corrosion-doctors, 2010; Çakır, 1989).

Akımsız nikel kaplamanın pek çok tipi endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar arasında akımsız nikel-fosfor, akımsız nikel-bor, akımsız nikel-kompozit kaplamalar yer alır. En yaygın kullanımı olan akımsız nikel-fosfor kaplamaların tipleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir:

### **2.2.1. Akımsız nikel-fosfor kaplamaların özellikleri**

Hipofosfit indirgemeli akımsız nikel, basit uygulama metodu ve benzersiz özelliklerinden dolayı sıra dışı bir mühendislik malzemesidir. Nikel-fosfor kaplama, üniform, sert, nispeten gevrek, yağlayıcı, kolay lehimlenebilir özelliktedir ve yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Çöktürme sertleştirilmesi işlemiyle, yüksek sıcaklık seviyelerinden düşük sıcaklık seviyelerine kadar ticari sert krom kaplamalara eşdeğer



aşınma dayanımı sağlar. Tüm bu özelliklerin birleşimi kaplamayı pek çok zorlu koşula uygun hale getirir. Fosfor içeriğine göre düşük (1-3 % P), orta (6-8 % P) ve yüksek (12-13 % P) fosforlu olarak sınıflandırılabilir. Düşük fosforlu akımsız nikel; sertlik, düşük sürtünme katsayısı, üniform kalınlık ve alkali ortamlarda çok iyi korozyon dayanımı niteliklerindedir. Orta fosforlu akımsız nikel; çok parlak ve yarı parlak kaplama opsiyonları ve yüksek kaplama hızına sahiptir, çok stabildir ve en yaygın kullanılan akımsız nikel tipidir. Yüksek fosforlu akımsız nikel, çok iyi korozyon koruması ve asit dayanımı, düşük porozite, düşük oranda lehimlenebilirlik, manyetik olmama (fosfor içeriği 11,2%'den büyük olduğunda), lekelenmeye daha az meyilli olma ve oyuksuz kaplama özelliklerine sahiptir. Yüksek fosforlu akımsız nikel, amorf yapıdadır ve yapısal çekme geriliminin etkisindeki kristal yapılı, düşük ve orta fosforlu akımsız nikelden farklı olarak yapısal basma geriliminin etkisi altındadır (Baudrand, 1994; Corrosion-doctors, 2010; Wikipedia, 2010).

### **2.2.1. 1. Yapı**

Hipofosfit indirgemeli akımsız nikel, mühendislik malzemesi olarak kullanılan bir kaç metalik camdan biridir. Kaplama solüsyonunun formülüne bağlı olarak, ticari kaplamalar nikelde çözülmüş % 6-12 oranında P ve % 0.25'e kadar da diğer elementleri içerir. Kaplamanın yapısı, kimyasal kompozisyonuna bağlıdır; % 5'e kadar fosfor içeren kaplamalar  $\beta$  nikel- fosforlu kristal, % 5 ile 8,5 arasında fosfor içerenler  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının karışımı ve kısmen kristal, % 8,5'in üzerinde fosfor içerenler ise sadece  $\alpha$  faz nikel-fosforlu amorf yapıdadır. Yüksek fosforlu kaplamalarda kristal yapı ya da ayrı fazlar gözlenmez. Akımsız nikelin sürekliliği de kompozisyonuna bağlıdır, % 10'dan fazla fosfor ve % 0,05'ten az safsızlık içeren kaplamalar süreklilyken, düşük fosfor içerikli kaplamalar özellikle de ağır metal ya da sülfür bileşikleriyle kirlenmiş olanlar gözenekli yapıdadır ve bu yüzden kaplamada delik ve çatlaklar meydana gelir. Nikel-fosfor akımsız kaplama, 220-260°C'nin üzerine ısıtıldığında yapısal değişimler başlar. İlk aşamada, alaşımda nikel fosfitin ( $Ni_3P$ ) kohezif ve bağımsız parçacıkları oluşur. Daha sonra, 320°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaplama kristalize olmaya ve

amorf karakterini kaybetmeye başlar. Sürekli ısıtma ile, nikel fosfit parçacıkları kümeleşir ve iki fazlı alaşım oluşur. Düşük fosfor içerikli kaplamalarda saf nikel baskın faz iken, %8'den fazla P içeren kaplamalarda nikel fosfit matris formundadır. Bu değişim, kaplamanın sertlik ve aşınma dayanımı özelliklerinde hızlı bir artışa, korozyon dayanımı ve süneklik özelliklerinde de azalmaya yol açar (Corrosion-doctors, 2010; Techmetals, 2010).

### **2.2.1. 2. İç stresler**

Akımsız nikel kaplamadaki iç stresler öncelikle kaplama kompozisyonunun fonksiyonudur. Örneğin çelik üzerine uygulanan %10'dan fazla fosfor içeren kaplamalarda gerilim nötral ya da basma yönündedir. Bununla birlikte malzeme ve kaplama arasındaki termal genişleme farkından dolayı düşük fosfor içerikli kaplamalarda çekme gerilimi 15-45 MPa' a yükselir. Bu kaplamadaki yüksek seviyede gerilim çatlak ve porozitelerin meydana gelmesine neden olur. 220°C'nin üzerindeki sıcaklıklardaki ısıtma işlemi süresince yapısal değişimler akımsız nikel kaplamada % 4-6 oranında hacimsel büzülme yol açar. Bu kaplamadaki çekme gerilimini artırır ve basma gerilimini azaltır. Kaplama gerilimi aynı zamanda kaplama solüsyonunda bulunan kompleks oluşturuç ajanların varlığıyla kaplanan ortofosfit ya da ağır metallerle de artar. Hatta bazı metallerin küçük miktarları gerilimi ciddi ölçüde artırır. 5 mg/l (20 mg/gal) bizmut ya da antimonun ilavesiyle çoğu banyoda kaplamanın çekme gerilimi 350 MPa (50 ksi)'ye kadar çıkar. Yüksek miktardaki iç stresler aynı zamanda kaplamanın sünekliğini azaltır ve çatlakları artırır (Baudrand, 1994; Techmetals, 2010).

### **2.2.1. 3. Üniformluk**

Akımsız nikelin en önemli avantajlarından biri kompleks geometri ve şekillere sahip parçalarda bile üniform kaplama kalınlığında uygulanabilmesidir. Elektrokaplama kalınlık, parçanın şekline ve parçanın anoda yakınlığına bağlı

olarak önemli miktarda değişir. Bu değişimler kaplamanın nihai performansını etkiler ve kaplama sonrasında ilave yüzey işleme gerektirebilir. Akımsız nikelde kaplama hızı ve kalınlığı, taze kaplama solüsyonuyla temas eden parçanın herhangi bir yüzeyinde aynıdır. Yivler ve kör delikler parçanın dış yüzeyiyle aynı miktarda kaplamaya sahiptir. Akımsız nikelde kaplama kalınlığı ihtiyaca uygun bir şekilde kontrol edilebilir. Elektronik komponentler için 2,5 µm kadar ince uygulanabilirken korozif ortamlar için 75 – 125 µm kadar kalınlıkta uygulanabilir (Orbel, 2010; Techmetals, 2010).

#### **2.2.1. 4. Tutunma**

Akımsız nikel kaplamanın tutunma özellikleri, pek çok ana metal için oldukça iyidir. Kaplamanın bağlanma kuvveti iyice temizlenmiş çelik malzemelerde en azından 400 MPa, alüminyum ve alaşımlarında ise 300 MPa değerlerine ulaşır. Paslanmaz çelik gibi, katalitik olmayan ya da pasif metallerde, başlangıç yer değiştirme reaksiyonu gerçekleşmez ve tutunma azalır. Uygun ön işlem ve aktivasyon ile kaplamanın bağlanma kuvveti genellikle 140 MPa'ı aşar. Alüminyum gibi metaller ise tutunmayı arttırmak için 190-210 °C'de 1,5 saat fırınlanır. Bu işlem esnasında parçadan ve kaplamadan hidrojen açığa çıkar ve kaplama ile ana malzeme arasında çok küçük miktarda kodüzyon sağlanır. Akımsız nikel kaplamaların tutunması kaplama öncesi temizleme ve hazırlık adımlarının uygun bir şekilde yapılmasına bağlıdır (Baudrand, 1994; Techmetals, 2010).

#### **2.2.1. 5. Fiziksel özellikler**

Akımsız nikel kaplamanın yoğunluğu fosfor içeriğiyle ters orantılıdır. Düşük fosfor içerikli kaplamanın yoğunluğu 8,5 g/cm<sup>3</sup> iken % 10-11 P içeren kaplamada yoğunluk 7,75 g/cm<sup>3</sup>'tür. Kaplamanın elektriksel ve termal özellikleri de kimyasal kompozisyonla değişir. Ticari kaplamalar için elektriksel direnç ve termal iletkenlik değerleri genellikle 50-90 µΩ.cm ve 0,010 – 0,013 cal/cm.s.°C civarındadır. Bu

kaplamlar, bakır ya da gümüş gibi konvansiyonel iletkenlere kıyasla önemli oranda daha az geçirgendir. Isıl işlemle alaşımdan fosforun çöktürülmesi, iletkenliği 3 ya da 4 kat artırır. Ayrıca kaplama solüsyonunun formülü de iletkenliği etkiler. Fosfor içeriği, akımsız nikelin ısıl genişmesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Yüksek fosfor içerikli kaplamalarda termal genişleme katsayısı yaklaşık olarak çeliğine eşittir. %10'dan daha fazla fosfor içeren kaplama manyetik değildir. Bununla birlikte düşük fosfor içerikli kaplamalarda manyetiklik şüphesi vardır (Techmetals, 2010).

#### **2.2.1. 6. Mekanik özellikler**

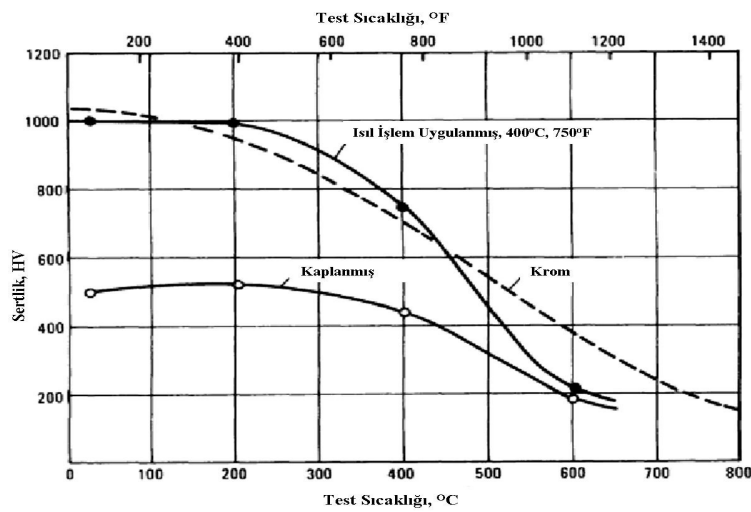
Akımsız nikel kaplamanın mekanik özellikleri diğer camsı malzemelerle benzerdir. Yüksek dayanım, sınırlı süneklik ve yüksek elastisite modülüne sahiptir. Ticari kaplamaların nihai çekme mukavemeti 700 MPa'ı aşar. Akımsız nikel kaplamanın sünekliğide kompozisyon ile değişir. Birçok mühendislik malzemesinden daha az sünek olmasına rağmen çok sayıda kaplama uygulaması için uygundur. Sertleştirme tipi ısıl işlemler akımsız nikel kaplamaların mukavemet ve sünekliğini azaltır. 220°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalmak, mukavemette %80–90 azalmaya yol açar ve sünekliği önemli ölçüde azaltır (Baudrand, 1994; Techmetals, 2010).

#### **2.2.1. 7. Sürtünme özellikleri**

Akımsız nikelin sürtünme özellikleri, krom kaplamaya benzer şekilde, çok iyidir. İçindeki fosfor, plastik kalıplama gibi pek çok uygulama için faydalı olan doğal bir yağlama sağlar. Akımsız nikelin çeliğe karşı sürtünme katsayısı yağlama koşulları için yaklaşık 0,13 yağlamasız koşullarda 0,4'tür. Kaplamanın sürtünme özellikleri fosfor içeriği ya da ısıl işlemle çok az değişir (Bal Seal Engineering, 2010; Baudrand, 1994; Techmetals, 2010).

### 2.2.1. 8. Sertlik ve aşınma dayanımı

Sertlik ve aşınma dayanımı pek çok uygulama için önemli özelliklerdir. Akımsız nikel kaplamanın mikrosertliği yaklaşık 500-600 HV100 civarındadır ki bu, yaklaşık olarak 48-52 HRC'ye eşittir ve pek çok sertleştirilmiş alaşım çeliğinin sertliğine eşittir. Bu alaşımlarda ısıl işlemlerle pek çok ticari sert krom kaplamaya eşit 1100 HV100 değerinde sertliklere ulaşılabilir. Bazı uygulamalarda parçanın eğilip bükülme ihtimali ya da ana malzemenin mukavemetinde azalma ihtimali yüzünden yüksek sıcaklık işlemi tolere edilemez. Bu uygulamalarda istenilen sertliği elde etmek için daha uzun süre ve düşük sıcaklıklar kullanılabilir. Akımsız nikel kaplama aynı zamanda mükemmel bir sıcak sertliğine de sahiptir. 400°C civarında ısıl işlem görmüş akımsız nikelin sertlik özellikleri sert krom kaplamaya yakındır. Isıl işlem görmemiş akımsız nikel kaplamada sertlik, daha düşük seviyelerde olmasına rağmen yüksek sıcaklarda da sertliğini korur. Şekil 2.1.'de % 10 P içeren kaplamada yükselen sıcaklığın sertliğe etkisi görülmektedir. Yüksek sertliği nedeniyle akımsız nikel kaplama ısıl işlem görmüş ve görmemiş hallerinde çok iyi aşınma dayanımına sahiptir. Akımsız nikel kaplama, elektrolitik nikel kaplama ve krom kaplama için Taber Abraser Index değerleri Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir (Baudrand, 1994; Techmetals, 2010).



Şekil 2.1. % 10 P içeren kaplamada yükselen sıcaklığın sertlik üzerindeki etkisi (Baudrand, 1994).

Çizelge 2.1. Farklı mühendislik kaplamalarının Taber abraser dayanımlarının kıyaslanması (Baudrand, 1994).

Kaplama	1 saat ısıtma işlemi, °C	Taber aşınma indeksi, mg/1000 çevrim (a)
Watts nikel	Yok	25
Akımsız Ni – P (b)	Yok	17
Akımsız Ni – P (b)	300	10
Akımsız Ni – P (b)	500	6
Akımsız Ni – P (b)	650	4
Akımsız Ni – B (c)	Yok	9
Akımsız Ni – B (c)	400	3
Sert krom	Yok	2

(a) CS-10 aşındırıcı tekerlek, 1000 g yük, toplam 6000 çevrimlik testte 1000 çevrim için ortalama ağırlık kaybı

(b) Hipofosfit indirgemeli akımsız nikel yaklaşık % 9 P içerir

(c) Borohidrit indirgemeli akımsız nikel yaklaşık % 5 B içerir

### **2.2.1. 9. Korozyon dayanımı**

Akımsız nikel, bariyer kaplama olarak kullanılır, çelik ve alüminyumdan daha soydur, malzeme ile çevresi arasında sızdırmazlık sağlayarak ana malzemeyi korur. Bu yüzden kaplamada gözenekler ve hatalar olmamalı, homojen bir mikroyapıya sahip olmalıdır. Amorf doğası ve pasifliği nedeniyle korozyon dayanımı çok iyidir ve pek çok çevrede saf nikel ya da krom alaşımlarından daha iyi performans gösterir. Amorf yapısı, tane ya da faz sınırlarındaki serbestlik, taneler arası korozyon riskini azaltırken yüzeyi pasive eden camsı film oluşmasına da katkıda bulunur. Nötral ve asidik ortamlarda korozyon dayanımı, kaplamadaki fosfor içeriği arttıkça artar. Alkali korozif ortamlar için ise tersi doğrudur. Akımsız nikelin korozyon dayanımı kompozisyonunun bir fonksiyonudur, pasiflik dereceleri ve korozyon dayanımları fosfor içeriğinden önemli derecede etkilenir. %10'dan fazla P içeren alaşımlar, nötral ve asidik ortamlarda düşük fosfor içerikli alaşımlardan daha dayanıklıdır. Düşük fosfor (%3-4) içerikli alaşımlar güçlü alkali ortamlarda yüksek fosfor içeriklilerden daha

dayanıklıdır. Ancak fosfor içeriği tek başına maksimum korozyon dayanımını sağlamak için yeterli değildir. Düşük kalitede sarf malzemesi kullanımı, reaksiyon yan ürünleri ve kirleticilerden kaynaklanabilen, kaplamada iz miktarından daha fazla bulunan safsızlıklar, kaplama kalınlığı, ısıl işlem ve durulama gibi kaplama sonrası işlemler, ana malzemeye uygulanan ön hazırlama işlemleri akımsız nikel kaplamanın korozyon performansını etkileyen diğer parametrelerdir. Banyoda uygulanan pek çok kaplamada kurşun, kalay, kadmiyum ya da sülfür ile inhibite olur. Bu elementlerin kaplamada iz miktarından daha fazla bulunması, 5-40 kat oranında korozyon dayanımının azalmasına neden olur. Akımsız nikelin korozyon dayanımını etkileyen en önemli değişkenlerden birisi de ısıl işlemdir. Nikel fosfor kaplamalar 220°C'nin üzerine ısıtıldıklarında, kalan malzemenin fosfor içeriğini azaltan nikel fosfit parçacıkları oluşmaya başlar. Bu durum, kaplamanın korozyon dayanımını azaltır. Bu parçacıklar aynı zamanda küçük aktif/pasif korozyon hücreleri oluşturur ki, bunlar sonrasında kaplamanın hasar görmesinde pay sahibidir. Ayrıca kaplama sertleştikçe büzülür ve bu şekilde oluşan çatlaklar da ana malzemeyi korozyona açık hale getirir. Oda sıcaklığındaki %10 HCl'de % 10,5 P içeren kaplama için, ısıl işlemin kaplama sertliği ve korozyon hızı üzerindeki etkisi Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir. Çizelgede de görüldüğü gibi 190°C'de fırınlama, hidrojen gevrekliğini giderme için kullanılan işlemle benzerdir, korozyon hızında önemli bir artışa yol açmaz. Bununla birlikte sertleştirme kaplamanın korozyon hızının 15µm/yıl'dan 900µm/yıl'a kadar artmasına neden olur. Diğer ortamlarda yapılan testler sertleştirme sonrasında benzer bir dayanım azalması görülmektedir. Korozyon dayanımının gerektiği durumlarda sertleştirilmiş kaplama kullanılmamalıdır (Baudrand, 1994; Orbel, 2010; Techmetals, 2010).

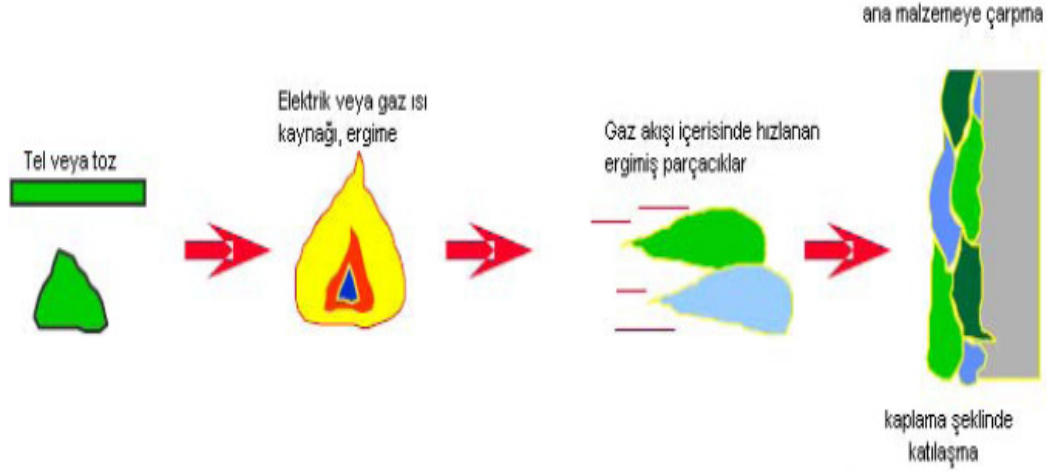
Çizelge 2.2. %10,5 P içeren akımsız nikel kaplamaların %10 hidroklorik asit solüsyonunda korozyonuna ısıtılmanın etkisi (Baudrand, 1994).

Isıl İşlem	Kaplama sertliği, HV100	Korozyon hızı	
		µm/yıl	mil/yıl
Yok	480	15	0,6
190°C'da 1,5 saat	500	20	0,8
290°C'da 6 saat	900	1900	75
290°C'da 10 saat	970	1400	55
340°C'da 4 saat	970	900	35
400°C'da 1 saat	1050	1200	47

### 2.3. Termal Sprey

Termal sprej metalik, seramik, sermet ve bazı polimerik malzemelerin toz, tel ya da çubuk formunda ergime noktası yakınına veya üstüne ısıtılarak bir torç ya da tabancaya beslenmesiyle uygulanan bir grup prosesin genel adıdır. Sonuçtaki ergimiş ya da yarı ergimiş parçacıklar bir gaz akımında hızlandırılarak kaplanacak yüzeye yani altlığa yönlendirilir (Tucker, 1994). Parçacıklar yüzeye çarpar, yassılaşırlar, ince plakalar oluştururlar, yüzeyin pürüzlü yüzeyine ve birbirlerine yapışırlar. Püskürtülen parçacıklar ana malzeme yüzeyine çarparken soğurlar, katılaşırlar ve kaplamayı meydana getiren lamelli yapıyı oluştururlar (Diltemiz, 2010). Şekil 2.2.'de termal sprej kaplama oluşumu görülmektedir.





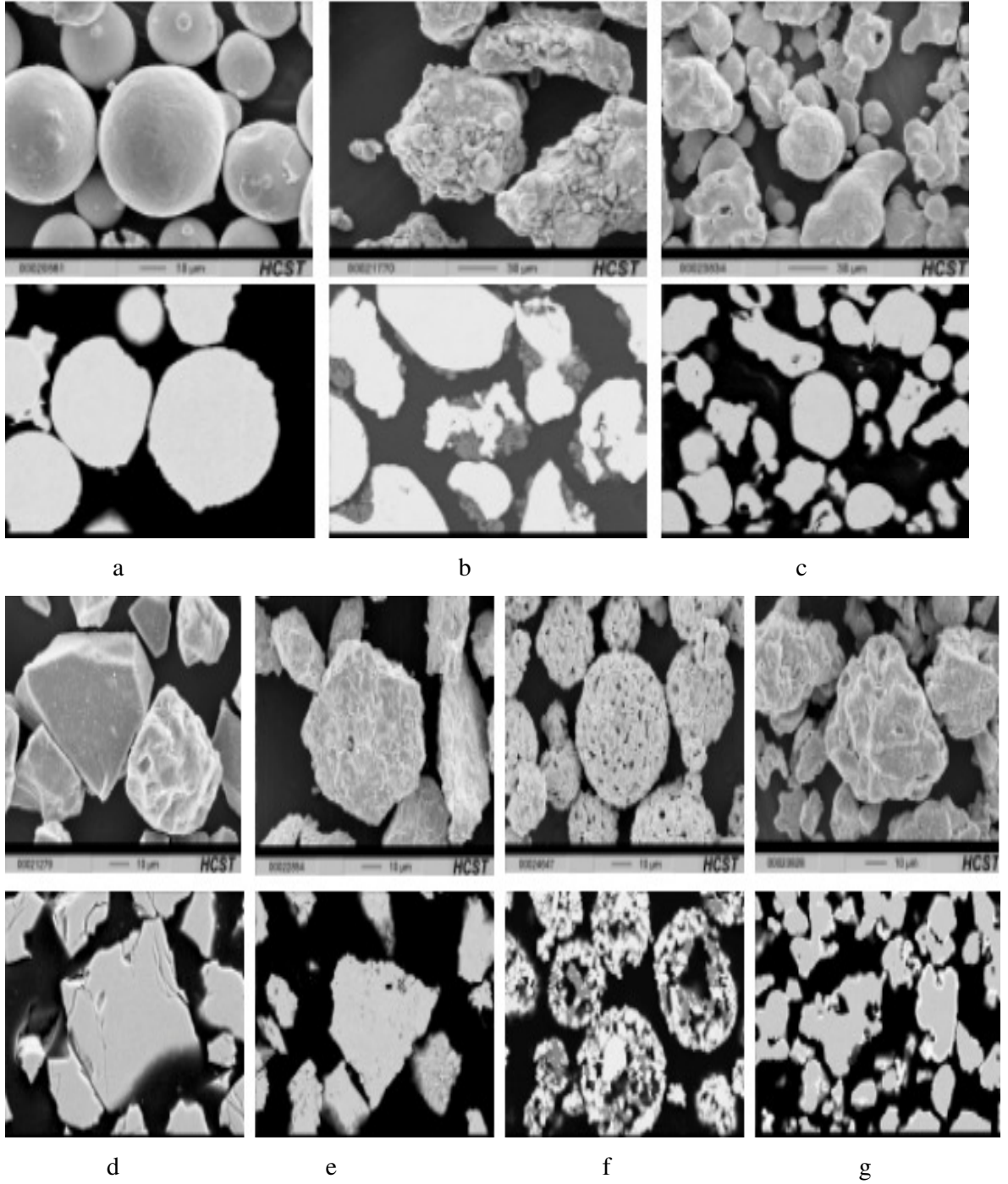
Şekil 2.2. Termal sprey kaplamanın oluşumu (Kaptan, 2010).

Parçacıkların yüzeye yapışma mekanizması çok iyi anlaşılamamış olsa da, tamamlayıcı eritme ya da difüzyon ısıl işlemi kullanılmadıkça, kaplanacak yüzey üzerindeki pürüzlülüklerde katılaştıran ve büzülen parçacıkların birbirine mekanik olarak kenetlenmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Termal sprey kaplamalarda bağlanma mukavemetini arttırmak için kaplama öncesi altlık yüzeyinin pürüzlendirilmesi zorunludur. Kaplama ve ana malzemenin çok iyi kombinasyonunun olduğu bazı durumlarda ana malzeme ile kaplama arasında difüzyon ya da bölgesel erime gözlenmektedir. Ana malzeme yüzeyi son derece temiz ve kaplama süresince önemli miktarda oksidasyon meydana gelmiyorsa Van der Waals kuvvetleri de rol oynayabilir. Bazı kaplama ana malzeme sistemlerinde de parçacıkların yüksek hızlı darbeleriyle toz parçacıkları ya da ana malzeme üzerindeki filmlerin parçalanmasıyla kimyasal bağların oluştuğu düşünülmektedir (Tucker, 1994; Yeşildal ve Günay, 2007).

Kaplamanın ana malzemeye gerektiği gibi bağlanması, ancak kaplanacak yüzeyin iyi bir şekilde hazırlanmasıyla mümkündür. Mekanik bağlanmanın yanında, partiküllerin ana malzeme ile mikro kaynaması ve kimyasal bağ oluşumunu içeren bağlanma mekanizmaları, temas alanının artırılmasını ve yüzeyin aktivasyonunu

gerektirir. Güçlü bir kaplama-ana malzeme bağı oluşturmak için gerekli asgari şartlar; yüzey üzerindeki nem, yağ ve oksit filmlerinin kaldırılması ve uygun bir yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasıdır. Üzerlerinde mevcut olan yağ, gres ve paslardan temizlenmiş ana malzeme yüzeyleri, bir aşındırıcı kullanılarak pürüzlendirilir. Kumlama işleminde aşındırıcı olarak dökme demir veya çelik tanecikler, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılır (Evcin, 2006). Kaplanacak yüzeylerin hazırlanmasını takiben ara vermeden kaplamanın uygulanması kaplanacak yüzeyin çevre şartlarından etkilenmemesi açısından önemlidir ve iyi bir yapışma için bu işlemin yapılması gereklidir (Yeşildal ve Günay, 2007).

Termal sprej prosesleriyle bozunmadan eriyen tüm malzemeler; metaller ve alaşımları, sermetler, polimerler kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Kaplama malzemesinin yoğunluğu, ısıl iletkenliği, erime noktası gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra morfoloji, tane boyut ve dağılımları ve üretim yöntemi gibi (sinter, kompozit vb.) özellikleri de kaplama performansını etkiler. Kaplama yöntemine bağlı olarak toz boyutu +5-120 µm arasında değişmektedir. Proseste tozun enerji kaynağına beslenmesinde ve sprej huzmesi içinde ergime davranışına tozun dış şekli etki etmektedir. Küresel toz şekli, tozun minimum yüzey/hacim oranına bağlı olarak, ısı transferini ve buna bağlı olarak da tozların ergime davranışını olumsuz yönde etkiler. Buna karşın, partiküllerin düzensiz şekilli olması tozun çok hızlı ergimesini sağlar. Genellikle metal karakterli tozlar, küresel, yuvarlatılmış ve aglomere edilmiş şekilde kullanılmaktadır. Seramik karakterli tozlar ise genellikle köşeli formda üretilmektedir (Sulzer Metco, 2010; Yüksek vd., 2006). Şekil 2.3.'de çeşitli termal sprej tozlarına ait SEM resimleri görülmektedir (Amperit, 2010).



Şekil 2.3. Farklı işlemler görmüş termal sprej tozlarına ait SEM görüntüleri:  
 a) gaz atomize, b) gözenekli kaplama, c) su atomize, d) ergimiş,  
 e) sinterlenmiş, f) aglomere edilmiş – sinterlenmiş, g) yoğun kaplama (Amperit, 2010)

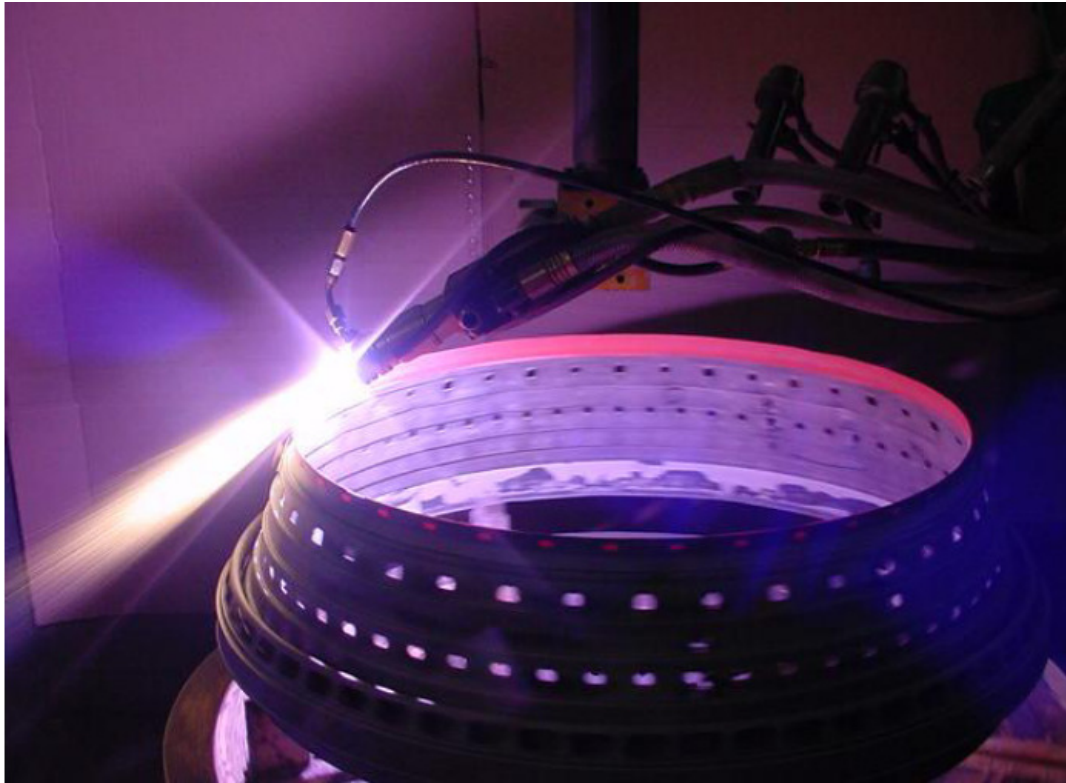
Termal spreyle üretilen kaplamalar lamelli bir yapıya sahiptir. Kullanılan spreyle yönteme ve kaplama tozlarına bağlı olarak az veya çok poroziteli, mikroçatlaklı, heterojen ve anizotropik (özelliklerin yöne bağlılığı) özellik gösterir. Ayrıca kaplamada tamamen ergimemiş ve yüzeyi oksitlenmiş partiküller de bulunur. Üretilen kaplamalar homojen değildir ve farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kaplama malzemeleri, kaplama/ergime esnasında faz dönüşümüne uğrayabilmektedir (Yüksek vd., 2006).

Termal spreyle kaplamalar, uygulanan prosese bağlı olarak, belirli bir miktarda geometrisi ve dağılımı üniform olmayan poroziteler ve ergimemiş parçacıklar içerirler. Alev spreyle ve elektrik ark spreyle yöntemlerinde yüksek oranda porozite oluşurken HVOF kaplamalar yoğun tabakalar şeklindedir ve porozite değerleri % 2'nin altındadır. Tipik plazma spreyle kaplamalar ise yaklaşık %5-15 oranında poroziteye sahiptir. Kaplama prosesi esnasında istenilen kalınlığa ulaşmak için spreyle tabancası kaplama üzerinde tekrarlı şekilde hareket eder, pasolar arasında olası oksit oluşumunu azaltmak için vakum ya da inert atmosferler kullanılabilir (Tucker, 1994; Sulzer Metco, 2010). Porozite, kaplamaların sertlik, aşınma direnci ve yapışma mukavemetini azaltır ve kullanım ortamına bağlı olarak iş parçasının servis ömrünü kısaltabilir. Artan tabanca (ergitme) gücü ve/veya spreyle mesafesinin kısaltılmasıyla porozite oluşumu azaltılabilir. Uçak motorlarında kullanılan türbin kanatçıklarının kaplamasında olduğu gibi bazı durumlarda da porozite istenir. Termal bariyer olarak üretilen kaplamalarda porozitenin % 10 ila % 20 arasında olması çok önemlidir. Kaplama bünyesindeki porların içine hapis olan hava tabakanın ısı iletkenliğini düşürür ve metalik türbin palesi için oldukça etkin bir koruma sağlar (Yüksek vd., 2006).

Ayrıca, kaplama işlemi esnasında kaplamanın çatlamasına veya ana malzemeden ayrılmasına yol açan basma ve çekme iç gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu iç gerilmelere; spreyle malzemesinin üniform olmayan dağılımı, kaplama ile ana malzeme arasındaki termal genişleme farklılığı, ana malzemenin üniform olmayan bir şekilde ısıtılmasıyla yine ana malzemenin şekil ve boyut özellikleri neden olmaktadır. Ara tabaka uygulaması ve spreyle esnasında ana malzemenin ön ısıtılması veya soğutulması ile bu iç gerilmeler azaltılabilir (Evcin, 2006). Seramik kaplamalarda altlık ile seramik

tabaka arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunun giderilmesine yönelik olarak uygulanan ara metalik kaplamalar (Ni-Al, Ni-Cr, NiAlCrY) yapışma mukavemetini de olumlu yönde geliştirir.

Termal sprej kaplama uygulamaları çok değişikdir, ama en yaygın kullanıldığı kategori aşınma ve/veya korozyon dayanımının artırılmasıdır. Diğer uygulamalar boyutsal onarım, termal bariyer ya da iletken, elektriksel iletken ya da direnç, elektromanyetik kalkan, radyasyon artırıcı ya da erteleyici olarak kullanımı şeklindedir. HVOF kaplamalar sert krom alternatifi olarak, titanyum ya da hidroksiapatit kaplamalar biyomedikal uygulamalarda kullanılırken yüksek sıcaklık korozyonuna karşı gaz türbinlerinde, tekstil, matbaa, otomotiv, metal, maden, kağıt, petrol üretimi, kimyasal, plastik ve havacılık endüstrilerine kadar geniş bir yelpazede termal sprej kaplamalar kullanılmaktadır (Tucker, 1994; Sulzer Metco, 2010). Şekilde uçak motoru yanma odası termal bariyer kaplama uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.4. Bir uçak motoru parçasına termal sprej uygulaması (Yüksek vd., 2006)

Termal sprej prosesinin avantajları:

- Kaplama için çok geniş yelpazede malzeme kullanılabilmesi,
- Pek çok termal sprej prosesinde önemli miktarda ısıtmadan kaplamanın ana malzemeye uygulanabilmesi, (Böylece makinelenmiş, ısı işlemleri yapılmış parçalara parçanın özelliklerini değiştirmeden ve parçada ısı bozunmaya yol açmadan çok yüksek ergime noktalarında malzemeler uygulanabilir. )
- Aşınmış ya da hasar görmüş kaplamaların parçanın özelliklerini veya boyutlarını değiştirmeden uygulanabilmesi,
- Geniş bir kaplama kalınlığı aralığında uygulanabilmesi,
- Geniş bir uygulama aralığında kullanılabilmesi (aşınma, korozyon, termal, elektriksel direnç, sızdırmazlık, ölçüye getirme vb.)

Dezavantajları:

- Sadece torç ya da tabancanın görebildiği yerlerin kaplanabilmesi, karmaşık geometrilere uygulanamaması,
- Düşük bağ mukavemeti (özellikle alev ve elektrik ark sprej için),
- Porozite,
- Anizotropik (yöne bağlı) özellikler,
- Düşük kapasite,
- Yüksek sıcaklık kaynaklı lokal ısınmalar (özellikle plazma ve HVOF'de)  
(Legg 2002; Tucker, 1994).

Termal sprej yöntemleri, yöntemde kullanılan püskürtme malzemelerinin formuna (tel, toz, çubuk) veya kullanım amacına göre (korozyon, yalıtım ve aşınmadan korunma) ve kullanılan enerji eldesine göre (alev, detonasyon ve patlama, indüksiyon plazma ve elektrik boşalması) sınıflandırılmaktadır. Termal sprej yöntemlerini düşük ve yüksek enerjili yöntemler olarak iki kategoriye ayırmak mümkündür. Düşük enerjili yöntemler olan alev ve elektrik ark sprej yöntemlerinde poroziteler daha yoğunken plazma sprej gibi yüksek enerjili yöntemlerde daha düşük poroziteli kaplama ve yüzeye daha iyi yapışma sağlanır (Tafralı, 2009).

### 2.3.1. Alev sprey

Alev sprey kaplama, termal sprey kaplama yöntemlerinin en basit ve ucuz olanıdır. Tel, çubuk veya toz formundaki kaplama malzemesi direkt olarak alev içerisine beslenir, malzeme nozul içinden geçerken oksijen ve yanıcı gaz karışımı yardımıyla ergitilmektedir. Ergiyen partiküller hızlandırılarak alev gazları yardımıyla ana malzeme üzerine püskürtülür. Ana malzemeye çarpan her bir ergimiş partikül yüzey üzerinde düzleşir ve hızlıca katılaştır. Alevin fonksiyonu metalin ergitilmesini sağlamaktır (Kıratlı vd., 2009; Ytmk, 2010).

Düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı yöntemin avantajları arasında yer alır. Ancak düşük bağ mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi, düşük çalışma sıcaklığı ve ana malzemeye daha yüksek ısı iletimi yöntemin olumsuz olan özellikleridir ( Tucker, 1994; Ytmk, 2010). Görece olarak düşük parçacık hızı nedeniyle, oksijene maruz kalma süresi uzadığından bu kaplamaların oksit miktarı bir miktar yüksektir (Diltemiz, 2010).

### 2.3.2. Elektrik ark sprey

Elektrik ark sprey prosesinde tel şeklindeki metal kullanılır. Gaz alevi veya elektrikle indüklenmiş plazma gibi dış ısı kaynağı kullanılmaması yönüyle diğer termal sprey yöntemlerinden farklıdır. Zıt yüklenmiş iki telin birlikte beslenmesiyle kesişme noktalarında meydana gelen kontrollü ark ile ısıtma ve ergitme meydana gelir. Ergimiş metal damlacıkları basınçlı hava akımı vasıtasıyla tabanca/nozul ucunda püskürtülür (Tucker, 1994; Ytmk, 2010).

Bu yöntem ile yüksek dolgu oranları elde edilebilir ve otomatik sistemlere uyarlanması da kolaydır. Ana malzemenin alevle temas etmemesinden dolayı diğer termal sprey proseslerine göre ana malzeme sıcaklığı düşüktür. Elektriksel olarak iletken, yumuşak telin kullanılması ile sınırlı olduğundan karbürler, nitrürler ve oksitler püskürtülemezler (Ytmk, 2010). Diğer yöntemlerin aksine sprey malzemesi hava

jetinin içine girdiğinde ergimiştir ve ark alanından uzaklaştığı anda soğumaya başlar bu da daha yüksek oksit içeriğine yol açar. Oksidasyonu önlemek için uçuş süresi kısaltılmalıdır.

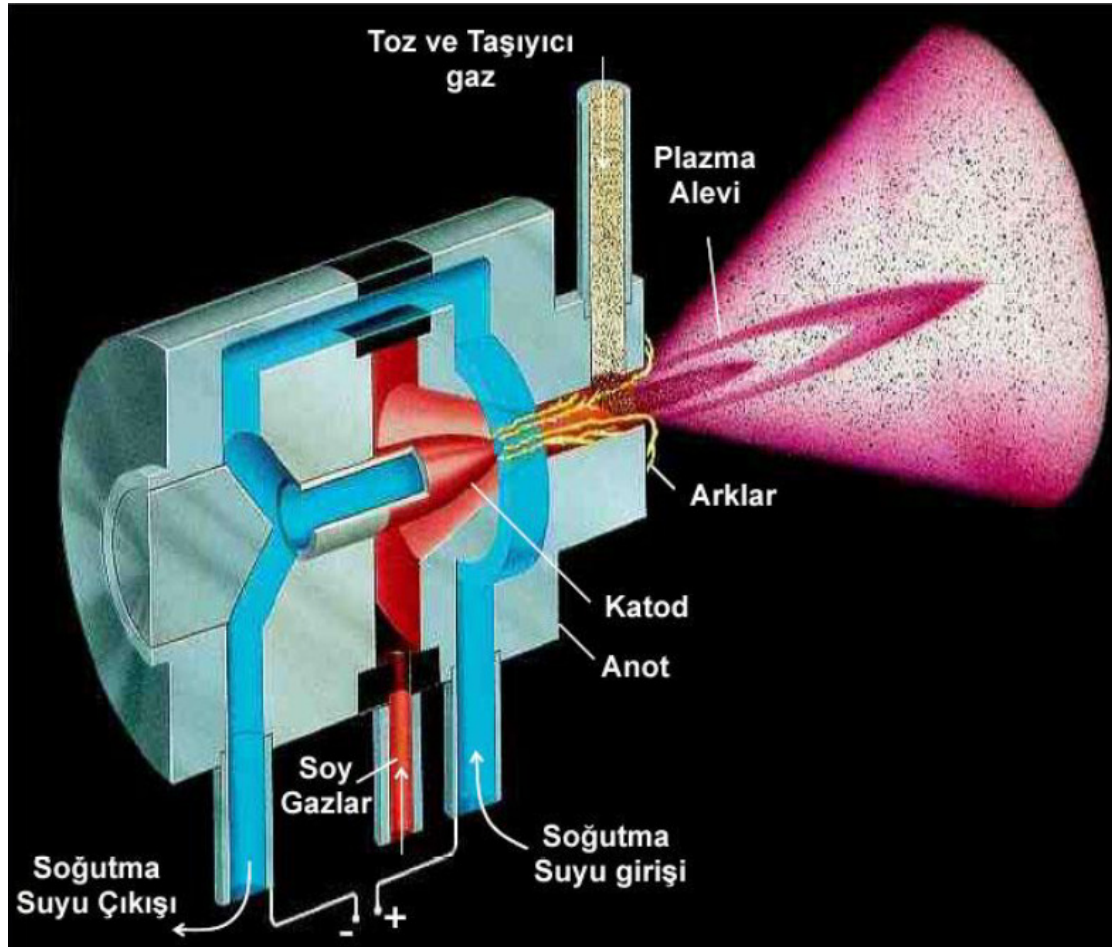
### 2.3.3. Plazma sprey

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazmanın başlıca iki önemli avantajı vardır. Birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık eldesinin mümkün olması, ikincisi ise diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır. Plazma tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkân sağlamaktadır. Ayrıca, inert ortamlarda kullanılabilmesi yöntemin bir diğer avantajıdır. Gazın iyonlaşma oranına göre, tam veya yarı tam iyonlaşmış plazmalar ve kısmi iyonlaşmış plazmalar olmak üzere iki çeşittir. Yüzey temizleme, plastik aktifleştirme, yüzey yakma, malzeme birleştirme ya da kesme, yüzey serleştirme ve termal sprey kaplama plazmanın kullanım alanlarından bazılarıdır (Erdoğan vd., 2006).

Plazma sprey kaplama teknolojisinde iş parçası üzerinde kaplanmak istenilen metalik, seramik, karbür, oksit, plastik veya kompozit karakterli tozların plazma enerjisinde ergitilmesi esastır. Plazma, kaplama tabancası içerisinde su soğutmalı bakır anot ile toryumlu katot arasında oluşturulan yüksek voltajlı ark (doğru akım) içerisinde plazma gazları olarak nitelendirilen Ar, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve He gazların geçirilmesiyle elde edilir. Plazma gazlarının elektrik arki içerisinde nötr durumları bozulur, ayrılma, iyonlaşma ve tekrar kombinasyon adımları sonucunda 20.000°K'e kadar çıkan yüksek sıcaklık meydana gelir. Isınan gazlar, radyal ve aksenal olarak genişir. Parçacık hızını arttıran süpersonik genişmeye, gazların dar boğazlı bir nozul içerisinde geçirilmesiyle ulaşılır. Kaplama tozları, plazma hücresinin içerisine taşıyıcı Ar gazı yardımıyla beslenir. İyonize gaz içerisinde ergiyen tozlar, çok hızlı bir şekilde önceden hazırlanmış altlığın/iş parçasının yüzeyine püskürtülür. Yüzeğe çarpan ergimiş veya yarı ergimiş



tozlar/partiküller yassılaşıır, lamelli bir hal alır ve ani soğuma sonucu ( $10^{-6}$  °C/sn) katılaşıır. Altlık yüzeyinde bu şekilde biriken binlerce, milyonlarca toz partikülü, ince tabakalı/lamelli kaplama tabakasını meydana getirir. Proses çok kısa bir sürede gerçekleşir (Yüksek vd., 2010). Plazma sprej tabancasının kesiti ve plazma oluşumu Şekil 2.5.' te verilmiştir.



Şekil 2.5. Plazma sprej tabancasının kesiti ve plazma oluşumu (Yüksek vd., 2006).

Plazma kaplama sistemi Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi sprej tabancası (plazma üflecisi), güç ünitesi, gaz besleme ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi ve kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.6. Plazma sistemi (Sulzer Metco, 2010).

Plazma spreynin sınıflandırması kaplama tabancasının bulunduğu ortama göre yapılmaktadır. Kaplama tabancası, açık atmosfer ortamı ve basıncında bulunuyorsa atmosferik plazma sprej, inert gaz veya vakum altında bulunuyor ise inert plazma sprej ve vakum plazma sprej olarak tanımlanır.

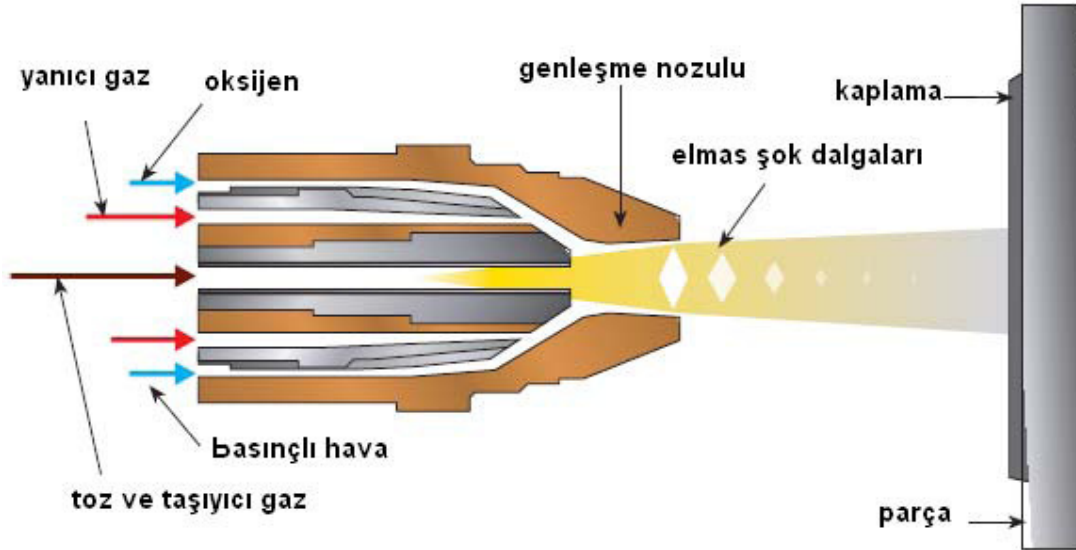
Kaplama prosesini kontrol eden parametreleri üç temel gruba ayırmak mümkündür. Bunlar kaplama tabancasına, kaplama malzemesine, püskürtme süreci ve altlık malzemesine bağlı kompleks bir süreçtir. Genel olarak yüzden fazla parametrenin kaplama sürecinde etkin olduğu literatürde belirtilmektedir. Başarılı bir kaplama üretmek için tüm parametrelerin optimize ve birbiriyle senkronize edilmesi önemlidir (Yüksek vd., 2006).

#### 2.3.4. Yüksek hızlı oksji-yakıt (HVOF) püskürtme

HVOF termal sprejde, yakıt gaz (genellikle hidrojen, propilen ya da kerosen) ve oksijen bir hazneye iletilir, burada ki yanma sonucunda oluşan süpersonik alev hızının daha da arttırıldığı bir nozula yönlendirilir. Kaplama malzemesi toz halinde bu akımın

içine beslenir. Toz tanelerinin kazandığı aşırı yüksek hız, yüzeye çarptığında yüksek yoğunlukta ve güçlü bir kaplama oluşturur. Parçacıkların yüzeye çarpma anındaki yüksek kinetik enerjisi, taneciklerin tam ergimemesi halinde bile kuvvetli bir mekanik bağ oluşmasına yol açar (Diltemiz, 2010).

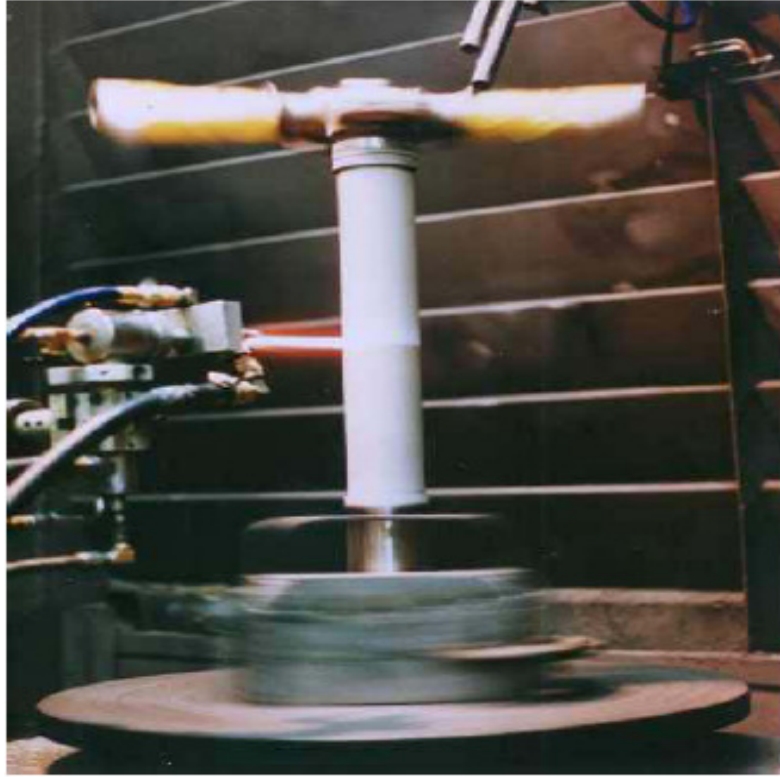
HVOF ile elde edilen kaplamalar yüksek spray partikül hızlarının elde edilmesi sebebiyle çok az porozite içermekte ve yüksek yoğunluğa sahip olmaktadır. En karakteristik özelliği, ergimiş partiküllerin yüzeye çarpma esnasında düzleşmesi ile meydana gelen sıçrama benzeri morfolojisidir. Oksit inklüzyonlar, karbür eriyikler ve tüm diğer mikroyapısal bileşenler lamelli yapı gösterirler (Bolelli et al, 2006 b). Ayrıca çok değişken bir sistemdir. Kullanılacak malzeme cinsine, istenilen kaplama kalitesine göre spray parametreleri değiştirilebilir (Ytmk, 2010).



Şekil 2.7. Yüksek hızlı oksijen yakıt sistemi (Sulzer Metco, 2010).

HVOF spray uygulaması akımla kaplama yönteminden tamamen farklı kaplama mikroyapıları sunan bir kaplama tekniğidir. Saf metaller, metal alaşımları, tungsten karbür/kobalt gibi sermetler, çeşitli seramikler ve polimerler bu yöntemle kaplanabilir.

Bu yönüyle HVOF geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. HVOF yöntemiyle uygulanan pek çok kaplamada gözeneklilik % 1'in, oksit içeriği de benzer şekilde % 1'in altındadır ve çekme mukavemeti de 80 MPa'ı aşmaktadır (Sartwell B.D., 2010a).



Şekil 2.8. İniş takımı iç silindirine, HVOF kaplama uygulaması (Sartwell and Legg, 2004).

#### **2.4. Krom Kaplama Alternatifleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

Toma ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada termal spreyle kaplanmış sermetlerin korozyon ve aşınma davranışları incelenmiştir. Nikel, krom ve kobalt içeren metalik bağlayıcılarda tungsten karbür (WC) ve krom karbür ( $Cr_3C_2$ ) tanecikleri içeren kaplamalar, HVOF yöntemiyle uygulanmıştır. Erozyon-korozyon testleri, oda sıcaklığında kum içeren 0,1M NaOH ve 0,1M  $H_2SO_4$  solüsyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon dayanımını ile ilgili bilgiler edinmek için

elektrokimyasal polarizasyon ölçümleri ve tuz sprej testi gerçekleştirilmiştir. Aşınma ve korozyon testlerinin sonuçları, sprej kaplamaların korozyon özelliklerinin aşınma-korozyon koşullarında malzeme kaybı hızından önemli oranda etkilendiğini göstermektedir. Kaplamada korozyon dayanımı az olan matrisler mevcutsa erozyon da artmaktadır. Karbid kaplamaların erozyon mekanizmasının karbidlerin kafesli ağlarıyla kontrol edilebileceği görülmektedir. Karşılaştırma için alev ve plazma sprej kaplamalı sert krom karbür kaplamalar incelenmiştir. Düşük elektriksel iletkenliği yüzünden bu kaplamaların korozyon hızı çok düşüktür. Erozyon koşullarında sert krom karbür kaplamalar yüksek erozyon hızı göstermektedir ve erozyon mekanizması darbe süresince oksit tanecikleri tane tane söküldüğü için kırılındır (Toma et al, 2001).

Tondu ve arkadaşları tarafından atmosferik plazma sprej yöntemiyle yumuşak metal yüzeylere atılan FeCr-TiC kompozit kaplamaların çok gözenekli olan yüzeylerinin aşınma dayanımını arttırmak için lazerle sırlama işlemi uygulanmıştır. Yüksek güçlü CO<sub>2</sub> lazer kullanılmıştır. Uygulamada lazerin güç yoğunluğu 8 kWcm<sup>-2</sup>, tarama hızı 3mms<sup>-1</sup>'dir. Kompozitin içindeki çelik matrisin eriyip TiC'in erimemesi ile güçlendirilmesi sağlanmıştır. Bu parametrelerle kaplama yüzeylerinde CCD kamera ile belirlenen sıcaklık 2000°C'dir. Taramalı elektron mikroskobu ile sprej kaplamaların gözenekli yapısı görüntülenmiştir. Sırlanmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri, kaplama yüzeyi yakınındaki gözeneklerin dolduğunu göstermektedir. X-ray difraksiyon ile lazerle sırlama öncesinde ve sonrasında TiC fazının kompozit kaplamanın içinde olduğu tespit edilmiştir. Salınlı aşınma dayanımı testleri ile lazerle sırlamanın kompozitlerin performansını arttırdığı belirlenmiştir (Tondu et al, 2000).

Nascimento ve arkadaşları tarafından 4340 yüksek dayanımlı çelik malzeme üzerindeki HP/HVOF termal sprej ve krom elektrokaplamanın özellikleri incelenmiştir. Çalışmada 4340 yüksek alaşımlı çelik malzeme üzerine HP/HVOF prosesi ile kaplanan tungsten karbür termal sprej kaplama ile yüksek verimlilikte, flor içermeyen ve bu çalışmada hızlandırılmış olarak adlandırılan krom kaplama ve geleneksel sert krom kaplamanın yorulma, korozyon ve aşınma testleri yapılarak kaplamalar karşılaştırılmıştır. Yorulma testi sonucunda tungsten karbür kaplamanın performansı daha iyi olmasına rağmen tüm kaplamalar AISI 4340 çeliğe zarar vermiştir. Aşınma

testinden elde edilen sonuçlarda da WC kaplamanın daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Tuz sprej testi sonucunda ise tüm numunelerin 72 saat sonrasında korozyona uğramıştır. Taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanılarak tüm kaplamalar için çatlak başlangıç bölgeleri, kalınlık ve yapışma ve sert krom elektro kaplama için mikroçatlak yoğunlukları belirlenmiştir (Nascimento et al, 2001).

Rastegar ve Richardson tarafından yüksek beygir güçlü dizel motorlarında krom kaplamaya alternatif olarak HVOF sermet kaplamaların kullanımı araştırılmıştır. Çeşitli kaplamalar test hücreleri ve motorlarda denenmiştir. Yoğun kaplamalar olan HVOF sermet kaplamaların çalışma koşullarında kabul edilebilir bir çatlak dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. HVOF kaplamalı piston halkaları krom kaplamadan üç ya da altı kat daha az, silindir gömleğindeki aşınma (karşılıklı yüzeyler) ise kromdan bir ila üç kat daha fazla şekilde gerçekleşmiştir. HVOF kaplamanın krom kaplamayla değişim için çevre dostu, iyi bir alternatif olduğu ve kromla kıyaslanınca daha düşük ya da eşdeğer üretim maliyetine sahip olduğu değerlendirilmiştir (Rastegar and Richardson, 1997).

Ibrahim ve Berndt tarafından yapılan çalışmada AISI 4340 çelik malzeme üzerine HVOF yöntemiyle kaplanan tungsten karbür WC-Co ve sert krom kaplamaların yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri kaplamalı ve kaplamasız numunelere uygulanmıştır. Kırılma morfolojisini değerlendirmek için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu yöntemleri kullanılmıştır. Yorulma testi sonuçları, kaplamalı AISI 4340 numuneleri arasında HVOF kaplamalı olanların kaplamasız olanlara kıyasla daha fazla yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermiştir (Ibrahim and Berndt, 2007).

Bozyazı ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrolitik sert krom ve ark-PVD CrN kaplamaların aşınma davranışları yağlanmış karşılıklı çalışma koşulları altında incelenmiştir. Deneyler formüle edilmemiş yağla gerçekleştirilmiş ve normal yük ile (5,10 ve 30N) sıcaklığın (oda sıcaklığından 60°C'ye) elektrolitik sert krom ve ark-PVD CrN kaplamalar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan yağda karşılıklı aşınma koşullarında CrN kaplamanın daha iyi performansı olduğunu göstermiştir. Bu durum, artan sıcaklık ve yük koşullarında daha da belirgin

olmuştur. Her iki kaplama için de oda sıcaklığında gerçekleştirilen testler sonrasında profilometrik aşınma derinliği belirlenememiştir. Bununla birlikte 60°C'de elektrolitik sert krom kaplama için profilometre ile tespit edilen aşınma derinliği 3,5 µm (30 N yükte) civarında olmuş, CrN kaplamalı disklerde profilometrik derinlik tespit edilememiştir. CrN kaplamalı disklerdeki karşılıklı aşınma testi ark-PVD kaplamanın tribolojik davranışı üzerinde damlacıkların önemli bir rolü olduğunu açıkça göstermiştir (Bozyazı et al, 2003).

Voorwald ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada AISI 4340 çelik malzeme üzerine HVOF yöntemiyle uygulanan WC-17Co ve WC-10Co-4Cr kaplamaların bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numuneleriyle, krom kaplamaya ait yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır. Ana malzeme, krom ve tungsten karbür kaplamalı numuneler için aksel yorulma testinden S-N eğrileri çizilmiştir. Sonuçlar tungsten karbür termal sprej kaplamanın sert krom elektrokaplama ile kıyaslandığında daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Termal sprej işlemi öncesinde yapılan bilyalı dövme AISI 4340 çeliğin yorulma dayanımını arttırmada faydalı bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Deneysel veriler WC-10Co-4Cr HVOF kaplamalı numunelerin WC-17Co'a kıyasla daha yüksek aksel yorulma ve korozyon dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Korozyon dayanımı için tuz sisi içerisinde deneyler yapılmıştır. Kırık yüzey analizi de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır (Voorwald et al, 2005).

Navinsek ve arkadaşları tarafından elektrokaplama ve akımsız proseslerin alternatifini olarak PVD kaplamanın değerlendirilmesi yapılmıştır. PVD sadece metalik değil aynı zamanda alaşımlı ve seramik kaplamalarında neredeyse limitsiz bir kimyasal kompozisyon aralığında uygulanabildiği bir tekniktir. Bu yüzden koruma, mekanik ve aşınma dayanımı özellikleri kontrol edilebilmektedir. Endüstriyel uygulamalar için galvanik kaplamalara kıyasla çok pratik olmadığı, günümüzde düşük maliyetli galvanik kaplamaların yerine kuru ve temiz PVD teknolojisinin tümüyle geçmesi yasal düzenlemelerle mümkün olabileceği belirtilmiştir (Navinsek et al, 1999).

Cho ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, farklı metalik bağlayıcıların uygulandığı WC sermet kaplamaların güçlü asidik ortamdaki korozyon davranışları incelenmiştir. Bağlayıcı malzemenin kompozisyonunun korozyon mekanizması üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ağırlıkça %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren solüsyonda elektrokimyasal ve uzun süreli daldırma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada WC-Co, WC-Co-Cr, WC-CrC-Ni ve WC-Ni kompozit tozları, HVOF yöntemiyle test kuponlarına kaplanmıştır. Deneysel sonuçlar havalandırılmış %5'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonunda WC tanecikleri ve metalik bağlayıcısı arasında önemli miktarda galvanik korozyon meydana geldiğini göstermiştir. Cr içeren kaplamaların korozyon dayanımı Cr içermeyenlerden daha iyi olmuştur. Cr içermeyen kaplamalarda WC partikülleri ve metalik bağlayıcı arasındaki galvanik korozyona ilaveten bağlayıcı malzemede genel korozyon da meydana gelmiştir. Yaşanan bu durumun aksine, Cr içeren kaplamalarda yüzeydeki pasif film oluşumu, bağlayıcının solüsyonda çözülümüne engel olmuştur. Bununla birlikte WC-CrC-Ni kaplamanın toplam korozyon dayanımı solüsyonun içeriye süzülmesi gibi davranan mikroçatlaklar yüzünden WC-Co-Cr'dan daha düşüktür. Metalik yapıştırıcı malzemenin kompozisyonu ve mikroçatlakların kontrolünün HVOF kaplamalı WC sermet kaplamaların güçlü asidik ortamlardaki korozyon dayanımını etkileyen en önemli faktörler olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, yüzey morfolojisi ve sürtünme katsayıları gibi aşınma-korozyon sonuçları da gösterilmiştir (Cho et al, 2006).

Natishan ve arkadaşları tarafından HVOF termal spreysel kaplamalar ve sert krom elektrokaplamanın tuz sisi korozyon ortamındaki davranışları ASTM B 117 standardına göre karşılaştırılmıştır. Elektrolitik sert krom ve HVOF yöntemi uygulanmış tungsten karbür-kobalt (WC/Co) ve Tribaloy T400 (T400) kaplamalar 4340 çelik, 7075 alüminyum alaşımı ve PH 13–8 paslanmaz çelik ana malzemeler üzerine uygulanmıştır. 7075 alüminyum alaşımı üzerine krom kaplama öncesinde nikel sülfamat uygulanmıştır. Sonuçlar 4340 çelik malzeme üzerindeki hiç bir kaplamanın yeterli korumayı sağlayamadığını, elektrolitik sert krom ve WC/Co kaplamaların performansının eşit ve T400 kaplamanın performansının biraz daha düşük olduğunu göstermiştir. 7075 Al alaşımı üzerinde nikel sülfamat üzerine atılan elektrolitik sert krom kaplama çok daha iyi bir performans göstermiş, numunenin yüzeyinde ya da



kenarlarında herhangi bir oyuklanma veya kabarcıklanma görülmemiştir. WC/Co kaplama yüzeyinde oyuklanma ya da kabarcıklanma göstermemiş ama kenarlarda önemli miktarlarda oyuklanmalar meydana gelmiştir. 13-8 paslanmaz çelik malzemede elektrolitik sert krom ve WC/Co kaplamalar iyi performans göstermiş, yüzeyde ve kenarlarda oyuklanma ve kabarcıklanmalar görülmemiştir. T400 kaplamada ise yüzeyde ve kenarlarda pas lekeleri oluşmuştur ama bu kusurlar, çıplak gözle ya da 7X büyütmeleli mercekle görülebilmiştir (Natishan et al, 2000).

Bolelli ve arkadaşları tarafından çeşitli elektrolitik sert krom kaplamalar ile metalik ve sermet HVOF (WC-17Co, WC-10Co-4Cr, Co-28Mo-17Cr-3Si) kaplamaların mikroyapı, mekanik özellikleri (Vickers mikrosertliği, kırılma tokluğu, elastik modül) ve tribolojik özellikleri (aşınma ve yağsız koşullarda kayma aşınması dayanımı) araştırılmıştır. Elektrolitik sert krom kaplamalar çok tok olduğundan Vickers mikrosertlik ölçümünde 10 N yük uygulandığında herhangi bir çatlama oluşmamıştır. Bununla birlikte yüzey morfolojisi ve Vickers mikrosertlik değerleri ana malzemenin hazırlama tekniği, kaplama prosesi karakteristikleri ve son kaplama işlemlerinden önemli şekilde etkilenmiştir. Bu da kaplamaların farklı aşınma koşullarında farklı davranışlar göstermesine yol açmış, özellikle daha sert kaplamaların aşınma dayanımı yüksek olmuş ama yağsız aşınma koşullarında daha çok kütle kaybı meydana gelmiştir. HVOF sermet kaplamalar daha serttir ancak elektrolitik sert krom daha tok olduğundan üç boyutlu aşınma koşullarında kıyaslanabilir hatta daha yüksek kütle kaybı söz konusu olmuştur. Bununla birlikte iki boyutlu kayma aşınmasının elektrolitik sert kromdan daha üstün olduğu; bunun sebebinin daha sonraki hasarlardan koruyan tok, üniform yüzey filminin meydana gelmesi olduğu değerlendirilmiştir (Bolelli et al, 2006 a).

Bolelli ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada HVOF sprey kaplamalar (WC-17Co, WC-10Co-4Cr, Co-28Mo-17Cr-3Si) ve elektrolitik sert krom kaplamanın korozyon dayanımları elektrokimyasal polarizasyon (0,1N HCl ve 0,1N HNO<sub>3</sub>) ve Corrodokote testi ile karşılaştırılmıştır. Elektrolitik sert krom, HNO<sub>3</sub> içerisinde pasive olurken, HCl'de ve Corrodokote testinde oyuklanma korozyonu görülmüştür. HVOF kaplamalar pasive olmaz, ancak daha soy korozyon potansiyeline sahiptirler. Hem HNO<sub>3</sub> hemde HCl'de benzer  $i_{corr}$  değerleri ile daha genel korozyon

gözlenirken HCl testi sonrasında ara yüzey boyunca çatlak korozyonu belirlenmiştir. 0,1 N HCl'de HVOF kaplamaların  $i_{corr}$  değerleri pek çok elektrolitik sert krom kaplamaya kıyasla daha düşük ölçülmüştür. Corrodokote testi sonrasında HVOF kaplamalarda gözle görülür bir hasar meydana gelmemiştir (Bolelli et al, 2006 b).

Khanna ve arkadaşları Ni-Cr tozuna emdirilmiş WC/Co kullanarak HVOF ve lazer sırlama teknikleriyle sert ve korozyona dayanıklı kaplamalar elde edilmesiyle ilgili çalışmışlardır. Sonuçta PM20 alaşımı ısı değiştirici tüplerin erozyon ve korozyon kontrolünde, optimize edilmiş kompozisyonda (NiCr matriksinde %15-30 WC/Co) HVOF kaplama uygulandığında en iyi sonucun alındığını ve uygulanan lazer sırlamanın da çok iyi sertlik ve uygun aşınma ve sürtünme özellikleri kazandırdığı belirtilmiştir (Khanna et al, 2009).

Sartwell ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 83/17 WC/Co ve Tribaloy 400 HVOF kaplamalar ile sert krom kaplamanın yorulma, korozyon ve aşınma dayanımı testleri gerçekleştirilerek karşılaştırması yapılmıştır. Yorulma testinde 4340 çelik malzeme üzerindeki farklı kaplamalar için S/N eğrileri çizilmiş ve HVOF kaplamalı örneklerin kaplamasız çelik malzeme ile eşit olduğu krom kaplamalı çeliğinsse özelliklerini kaybettiği görülmüştür. ASTM B 117 ve GM 9540 P/B standartlarını kullanarak yapılan korozyon çalışmalarında 7075 alüminyum alaşımlarında sert krom kaplamanın HVOF kaplamadan daha iyi, 4340 çelik ve PH13-8 paslanmaz çelik malzemelerin ise eşit performans gösterdiği bulunmuştur. Abrasif aşınma testinde de HVOF WC/Co kaplamaların sert krom kaplamadan daha düşük T400 kaplamaların ise daha yüksek aşınma hızlarında olduğu belirlenmiştir (Sartwell et al, 1998 b).

Fedrizzi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kompozisyonu  $75Cr_3C_2-25NiCr$  olan konvansiyonel ve nano tozlar AISI 1045 çeliğe uygulanmıştır. Tribo-korozyon testini gerçekleştirmek için özel bir aparat kullanılmıştır. Uygulanan yük, 5 ila 80N arasında, numunenin dönme hızıda yaklaşık 200 rpm'dir. Karşı yüzeydeki alüminyum blok, halka konfigürasyonundadır. Elektrokimyasal metotlar indirgenme mekanizmasını modifiye ve kontrol etmek için kullanıldıktan sonra tribo korozyon testi farklı çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir : (a) serbest korozyon (polarizasyon

uygulanmamış); (b) sadece yağlanmış aşınma (katodik polarizasyonun uygulanmasıyla); (c) zorlamalı korozyon (anodik akım uygulanmasıyla). Sermet kaplamaların davranışları konvansiyonel sert krom kaplama ile kıyaslanmıştır. Nano tozlu kaplamalarda seçilen tüm çalışma koşullarında sert krom ve konvansiyonel HVOF kaplamalara kıyasla çok daha az ağırlık kaybı olması dikkate değer bulunmuştur. Bunun daha az yüzey pürüzlülüğü, metal matrikste bikarbidlerin daha düzgün dağılımı ve kaplamanın daha düşük porozite oranından kaynaklandığı düşünülmektedir (Fedrizzi et al, 2004).

Picas ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada üç farklı aglomere edilmiş, çeşitli toz dağılımındaki beslemeden alınan HVOF CrC75 (NiCr20) 25 kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmanın amacı, bu yeni HVOF kaplamaları piston halkası ve valf gövdelerine uygulamaktır. Ayrıca çalışmada ince tozlar kullanılarak plazma spreycaplamalar kullanıldığında gerekli olan kumlama ve taşlama operasyonlarının önüne geçilmiştir. Kaplama mikroyapısı BSE-SEM ile, pürüzlülükteki değişiklikler profilometre ile belirlenmiştir. Sertlik ölçmek ve kaplamanın elasto-plastik özelliklerini belirlemek için ultra-mikro işaretleme teknikleri kullanılmıştır. Pin on disk kullanılarak yağlama ve kuru koşullarda farklı kaplamaların sürtünme ve aşınma özellikleri değerlendirilmiştir. En düşük toz ölçüsüne sahip CrC-NiCr kaplamanın çalışılan tüm koşullarda en iyi aşınma dayanımı özelliklerini gösterdiği tespit edilmiştir. İnce CrC-NiCr kaplamalar mekanik ve tribolojik özellikler yönünden sert krom kaplamadan daha iyi performans göstermektedir ve sert krom kaplamaya alternatif olarak kullanılabilir (Picas et al, 2006)

Lima-Neto ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, krom ve Ni-Cr-P kaplamaların klor içeren sulu ortamdaki elektrokimyasal korozyon davranışları, yapısal ve morfolojik özellikleri tespit edilmiştir. Tüm kaplamalar bakır ana malzeme üzerine uygulanmıştır. Kaplamaların 0,1 mol NaCl içeren sulu solüsyondaki potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden hareketle elektrokimyasal korozyon davranışları belirlenmiştir. Isıl işlem sonrasında krom kaplamada çatlaklar gözlenmiştir ki bunlar kaplamaya bazı mekanik ve korozyon dayanımı özellikleri katmıştır. Ni-Cr-P kaplamalarda ise ısıl işlem sonrasında 325°C'de Ni ve Ni<sub>3</sub>P fazlarının oluşumuyla kristalizasyon meydana gelmiş ve sertliği

artmıştır. Uygulanan Ni-Cr-P kaplamalar arasında  $Ni_{66}Cr_{12}P_{22}$  özellikle oda sıcaklığını aşan operasyon sıcaklıklarının gerektiği endüstriyel uygulamalar için en uygun krom kaplama alternatifi olarak belirlenmiştir (Lima-Neto et al, 2006).

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tek kaplama banyosunda elektrokaplama ile elde edilen Ni-P alaşım kaplamaların korozyon dayanımı ve yağlanmış koşullarda aşınma davranışları incelenmiş ve krom kaplama ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Ni-P kaplamaların  $400^{\circ}C$ 'de maksimum sertliğe ulaştığını ve %10'luk HCl solüsyonundaki korozyon dayanımının krom kaplamadan daha iyi olduğunu göstermektedir. Yağlama koşullarında normal yük ve kayma hızının kontrol edilmesiyle elde edilen Stribeck eğrilerinden üç farklı rejime karşılık gelen farklı yağlama mekanizmaları belirlenmiştir. Yağlama koşullarında ısıl işlem görmüş Ni-P kaplama krom kaplamaya kıyasla nispeten düşük aşınma dayanımına sahip olduğu değerlendirilmiştir (Wang et al, 2006).

Sankara Narayanan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada akımsız Ni-P/Ni-B çift katlı kaplamanın sertlik, aşınma ve korozyon dayanımı özellikleri değerlendirilerek, benzer kalınlıktaki Ni-P ve Ni-B kaplamalarla karşılaştırılmıştır.  $450^{\circ}C$ 'de 1 saat ısıl işlem sonrasında kaplandığı zaman amorf yapıya sahip olan kaplamalar kristalleşmiş ve nikel, nikel fosfit ve nikel boridler oluşmuştur. Çift katlı kaplamada üç fazın her birinin mevcut, kaplama ve katmanları arasının düzgün yapıda olduğu tespit edilmiştir. Mikrosertlik, aşınma ve korozyon dayanımı özellikleri aynı kalınlıktaki Ni-P ve Ni-B tekli kaplamalardan daha yüksektir. İnceleme yapılan kaplamalardan Ni-B katmanının üstte olduğu kaplamanın sertlik ve aşınmasının, Ni-P katmanının üstte olduğu kaplamanın ise korozyon dayanımının daha iyi olduğu belirlenmiştir (Sankara Narayanan et al, 2003).

Jokinen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada HVOF kaplamaların gözenekli yapısından kaynaklanan sorunları azaltmak için ana malzeme üzerine akımsız nikel, onun üzerine de HVOF kaplama uygulanmıştır. Akımsız nikel kaplama uygulanmamış örnekle paralel bir şekilde mikrosertlik, mikroyapı analizi, bükme testi ve tuz testleri

gerçekleştirilmiştir. HVOF kaplama uygulaması esnasında meydana gelen yüksek sıcaklık, akımsız nikel kaplamadaki amorf yapıyı kristal yapıya dönüştürmüştür. Çalışma sonunda, çift katlı kaplamaların iyi korozyon ve aşınma dayanımı özellikleri sunduğu sonucuna varılmıştır (Jokinen et al, 1999).

Prado ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sert krom kaplamaya alternatif olarak nanokristal kobalt-fosfor alaşımlarının elektrokaplaması araştırılmıştır. Yüzey morfolojisi, sertlik, mikroyapı, korozyon dayanımı ve aşınma dayanımı özellikleri incelenmiştir. Bu araştırmanın sonucunda kobalt-fosfor nano kristal alaşımlarının elektrolitik kaplanmasının, yüksek katot verimliliği, kaplama hızı, sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri yönünden sert krom kaplama için oldukça güçlü bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır (Prado, 2009).

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneylerde kullanılan ana malzemenin seçimi ve özellikleri, bu malzemeye uygulanan;

- Elektrolitik krom,
- Akımsız nikel,
- Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ , %3  $TiO_2$ ) plazma sprej,
- Tribaloy 400 (Co-28Mo-8Cr-2Si) plazma sprej,
- Tungsten karbür (WC-%12Co) plazma sprej,
- Krom karbür (%75  $Cr_3C_2$ , %20 Ni, %5 krom tozu) plazma sprej,
- Tungsten karbür (WC-10Co-4Cr) HVOF

kaplama ların uygulanış şekilleri ile proses parametreleri, kaplama özelliklerinin iyileştirilmesi için uygulanan modifikasyonlar ve kaplama ların özelliklerini değerlendirmek ve karşılaştırabilmek için yapılan ;

- Görünüş ve yapışma,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Kalınlık,
- Mikrosertlik,
- Çekme testi,
- Mikroyapı analizi,
- Aşınma testi,
- 0,1 N HCl içerisinde elektrolitik korozyon testleri,
- 1 N HCl içerisinde daldırma testi,
- Tuz testlerinin

test yöntemleri anlatılmıştır.

### 3.1. Ana Malzeme Seçimi

Tez çalışmasında uçak motorlarında kullanılan ve krom kaplama prosesi uygulanan demir esaslı bir süper alaşım olan A286 ile çalışılmıştır. A286'nın ana bileşenleri; demir, nikel ve kromdur. Tüm metalurjik koşullarda östenitik matriks formundadır ve çökelimli sertleşebilir. 700<sup>0</sup>C'ye kadar sıcaklıklarda iyi mukavemet ve oksidasyon dayanımı özelliklerine sahiptir (Davis, 1997; Special Metals, 2010). Sulu ortam korozyon dayanımı 316L paslanmaz çelik ile benzerdir (Rolled Alloys, 2010).

A286'nın plaka formu olan 1800<sup>0</sup>F'da solüsyon işlemi yapılmış, kompozisyonu aşağıda verilen AMS 5525 şartnamesine uygun test kuponları kullanılmıştır. Yukarıda verilen test ve değerlendirmeleri gerçekleştirebilmek amacıyla, 100x100 mm kare, 25x100 mm dikdörtgen ve 25 mm çapında disk numuneler kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. A286'nın kompozisyonu (Azomaterials, 2010 a).

Element % Oran	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
	≤ 0,08	≤ 2,00	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 1,00	13,50- 16,00	24,00- 27,00
	<b>Mo</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Al</b>	<b>B</b>	<b>Co</b>	<b>Fe</b>
	1,00- 1,50	1,90- 2,35	0,10- 0,50	≤ 0,35	0,003- 0,010	≤ 1,00	Geri kalan

### 3.2. Uygulanan Kaplamalar

Bu bölümde uygulanan kaplamalar özetle anlatılmıştır.

### 3.2.1. Krom kaplama

Krom kaplama prosesi öncesinde parçalara yağ alma, akım uygulanarak alkaliyle elektrolitik temizleme, sülfürik/hidroflorik asit çözeltisinde dağlama ön işlemleri uygulanmıştır. Sonrasında kromik ve sülfürik asit içeren 52-57 °C'deki krom kaplama çözeltisinde 15-77 A/dm<sup>2</sup>'de istenilen kalınlık elde edilinceye kadar sert krom kaplanmıştır. Kaplama prosesi sonrasında kaplama; yüzeyin düzgün, üniform görünümlü olması ve tabakalaşma, çukurlaşma, çatlama, köşelerde birikme gibi istenilmeyen durumların olmaması yönünden kontrol edilmiş, 200 °C'de 3 saat fırınlanarak gerilim giderme işlemi yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Sert krom kaplama parametreleri

<i>Banyo kompozisyonu</i>	CrO <sub>3</sub> 250 g/l; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2,5 g/l; ilavesiz
<i>Banyo sıcaklığı (°C)</i>	52-57
<i>Yaklaşık akım yoğunluğu (A/dm<sup>2</sup>)</i>	≈ 40
<i>Banyo karıştırma metodu</i>	Yok
<i>Kullanılan anot</i>	Kurşun %93; kalay %7

### 3.2.2. Akımsız nikel kaplama

Akımsız nikel kaplama prosesi öncesinde parçalara yağ alma, akım uygulanarak elektrolitik temizleme, hidroklorik asit çözeltisinde temizleme ve ön nikel kaplama çözeltisinde 3,8-8 A/dm<sup>2</sup>'de oda sıcaklığında ön kaplama işlemleri uygulanmıştır. Sonrasında 77-88 °C'deki akımsız nikel kaplama çözeltisinde istenilen kalınlık elde edilinceye kadar akımsız nikel kaplanmıştır. Kaplama prosesi sonrasında kaplama; yüzeyin düzgün, üniform görünümlü olması ve tabakalaşma, çukurlaşma, çatlama, köşelerde birikme gibi istenilmeyen durumların olmaması yönlerinden kontrol edilmiş, kaplama sertliğini arttırmak amacıyla 400 °C'de 1 saat fırınlanmıştır.



Çizelge 3.3. Akımsız nikel kaplama parametreleri

<i>Ön nikel kaplama banyo kompozisyonu</i>	NiCl <sub>2</sub> 210 g/l; HCl 110 ml/l; nikel anot
<i>Akımsız nikel banyo kompozisyonu</i>	Enstrip Ni 418A, B, C (Nikel sülfat, sodyumhipofosfit içerikli)
<i>Banyo sıcaklığı (°C)</i>	77-88
<i>Banyo karıştırma metodu</i>	Havalı
<i>Filtrasyon</i>	Sürekli, tank tabanından alınan çözeltiler filtre edilerek sisteme verilmekte
<i>pH</i>	5,2-5,6

### 3.2.3. Termal sprej kaplamalar

Termal sprej kaplama işlemlerinde pürüzlülük değeri kritik olduğu için, kuponların kumlama işlemi öncesi ve sonrasında pürüzlülük ölçümü yapılmış ve 10-15 psi basınçta kumlama işlemi yapılarak pürüzlülük değerinin 2,1-3,8 µm değerleri arasında olması sağlanmıştır. Kumlama işlemi Guyson Finishing Systems Model C400 kumlama makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Test kuponları kumlama işlemi sonrasında bekletilmeden 30 dakika içerisinde termal sprej kaplanmıştır.

Gerekli pürüzlülük değeri sağlandıktan sonra Metco 9MP, ABB robot sistemi kullanılarak alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbür kaplamalar uygulanmıştır. Kullanılan kaplama tozlarına ait bilgiler Çizelge 3.4'te, plazma sprej kaplama parametreleri Çizelge 3.5.'te verilmiştir. Alüminyum oksit termal sprej kaplama için bağlayıcı kat olarak bir kaç mikron kalınlığında nikel alüminyum (Metco 404) kaplama kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Kaplama tozlarının özellikleri

	<b>Ağırlıklı tane boyut aralığı (mesh-<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tane şekli</b>	<b>Üretici firma</b>	<b>Kimyasal bileşim (% ağırlık)</b>
<b>1</b>	-200 mesh/+30 $\mu\text{m}$ -75 $\mu\text{m}$ /+30 $\mu\text{m}$	Köşeli, kompak, ergitilmiş, kırılmış	Saint Gobain (No: 112)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %3 $\text{TiO}_2$
<b>2</b>	-325 mesh/+15 $\mu\text{m}$ -45 $\mu\text{m}$ /+15 $\mu\text{m}$	Küresimsi	Triballoy (T400)	Co-28Mo-8Cr-2Si Mo:28,5; Cr:8,5; Si:2,6; Co: Kalan
<b>3</b>	-325 mesh/+10 $\mu\text{m}$ -45 $\mu\text{m}$ /+10 $\mu\text{m}$	Sinterlenmiş	Praxair (WC 114)	WC-12Co Co:12,0; C:5,3; W:Kalan
<b>4</b>	-325 mesh/+5 $\mu\text{m}$ -45 $\mu\text{m}$ /+5 $\mu\text{m}$	Karışım	Powder Alloy Corp. (PAC 131)	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{NiCr}$ $\text{Cr}_3\text{C}_2$ :75; Ni:20; Krom tozu 5
<b>5</b>	-325 mesh/+15 $\mu\text{m}$ -45 $\mu\text{m}$ /+15 $\mu\text{m}$	Aglomera edilmiş & sinterlenmiş	Praxair (1350 VM)	WC-10Co-4Cr Co:10; Cr:4

1: Alüminyum oksit, 2: Tribaloy 400, 3: Tungsten karbür, 4: Krom karbür, 5: HVOF tungsten karbür

Çizelge 3.5. Plazma sprey proses parametreleri

<i>Kaplama Malzemesi</i>	Alüminyum oksit	Tribaloy 400	Tungsten karbür	Krom karbür
<i>Plazma gazları</i>	Ar + H <sub>2</sub>	Ar + H <sub>2</sub>	Ar + H <sub>2</sub>	Ar + H <sub>2</sub>
<i>Plazma gazları akış hızı (scfh)</i>	100 – 15	120 – 12,5	110 – 12,5	90 – 10
<i>Plazma gazları basıncı (psig)</i>	100 – 50	90 – 50	100 – 50	100 – 50
<i>Akım (amper)</i>	500	500	400	500
<i>Sprey mesafesi (inch)</i>	4,5	4,5	4,5	4,5
<i>Travers hızı</i>	%90 – 2	%80 ve %100	%95 ve %100	%100
<i>Toz besleme taşıyıcı gaz basıncı (psig)</i>	50	50	50	50
<i>Toz besleme taşıyıcı gaz akış hızı (scfh)</i>	13,5	13	13,5	15
<i>Toz besleme hızı (g/dak)</i>	50	45	30 ve 20	30
<i>Soğutma havası</i>	-	Paralel ve 50 psi	Paralel ve 60 psi	Paralel ve 50 psi

HVOF kaplama prosesinde kullanılan toza ilişkin bilgiler Çizelge 3.4., kaplama proses parametreleri Çizelge 3.6.'da görülmektedir. HVOF prosesi için Praxair JP8000 sistemi kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Yüksek hızlı oksijen yakıt sprey proses parametreleri

<i>Kaplama Malzemesi</i>	Tungsten karbür (WC-10Co-4Cr)
<i>Azot akış hızı (scfh)</i>	23
<i>Kerosen akış hızı (gph)</i>	6,5
<i>Oksijen akış hızı (scfh)</i>	2000
<i>Mesafe (inç)</i>	17–18
<i>Toz besleyici (rpm)</i>	8
<i>Yanma basıncı (psi)</i>	105–107
<i>Soğutma havaları</i>	İki tarafta ve çarpaz

### 3.3. Kaplamalara Uygulanan Modifikasyonlar

Kaplamalara uygulanan modifikasyonlar aşağıda özetlenmiştir.

#### 3.3.1. Nikel kaplama üzerine kombinasyon kaplama (codep) uygulaması

Test kuponlarına yağ alma ve temizleme işlemlerini takiben akımsız nikel ve nikel sülfomat kaplamalar uygulanmış sonrasında da, belirli oranda karıştırılmış alüminyum oksit, codep tozu ve amonyum florür içeren kutu içerisinde ki toza gömülerek fırında argon ve hidrojen gazları akışıyla ısıtılmasıyla codep difüzyon kaplama uygulaması yapılmıştır.

#### 3.3.2. Sprey kaplamalara bilyeli dövme uygulaması

Plazma sprey kaplama sonrasında yapılan bilyeli dövme işlemiyle kaplamanın yüzey özelliklerini iyileştirmek, kaplamayı sıkılaştırıp poroziteleri doldurmak mümkün olabilmektedir (Shotpeener, 2001). Çalışma kapsamında uygulanan kaplamalar için

bunun mümkün olup olmayacağını belirlemek amacıyla plazma spreylili kuponlara 60 psi basınç, 3 in mesafe ve 30 sn süre ile S110 çelik bilye uygulanmıştır.

### **3.3.3. Termal spreylili kaplamalara karbürizasyon uygulaması**

Tribaloy 400 (Co-28Mo-8Cr-2Si) test kuponları aktivatörlü sert odun kömürü içerisinde 1650–1700 °F sıcaklıkta 12–14 saat bekletilerek kutu karbürizasyon yöntemi uygulanmıştır.

### **3.3.4. Termal spreylili kaplamaların üzerine akımsız nikel uygulaması**

Termal spreylili kaplamaların yüzey boşluklarını doldurup daha az pürüzlü ve aşınma dayanımı yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek amacıyla termal spreylili kaplamaların üzerine akımsız nikel uygulaması yapılmıştır. Sonrasında sertliği arttırmak amacıyla 400°C’de 1 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur.

### **3.3.5. Termal spreylili kaplamalara lazer sırlama (glazing) uygulaması**

Alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbür kaplamalara 1600–1700–1800–1900 W güçlerinde, 4 in mesafe, 10 h frekans ve % 100 ilerleme hızı parametreleri ile lazer ile sırlama yapılmıştır. İşlem için Huffman Model HE–855 lazer tezgâhı kullanılmıştır. Lazer sırlama uygulanan numunelerin optik mikroskopta incelenmesinde Tribaloy 400 haricindeki numunelerde kaplamada meydana gelen sıcaklık farklılıklarının yol açtığı çatlak ve yanıkların oluştuğu görülmüştür. Bunun üzerine lazer sırlama işlemi sadece Tribaloy 400 test kuponları ile gerçekleştirilmiştir. Tribaloy 400 kaplamalı numunenin sırlama işlemi için kullanılan değerler 1700 W, 4 in mesafe, 10 h frekans ve %100 ilerleme, 2,5 mm paso aralığı şeklindedir.

### 3.4. Yapılan Testler

Krom kaplama alternatiflerinin aşınma ve korozyon özelliklerinin araştırılması amacıyla aşağıdaki testler gerçekleştirilmiştir. Numune kodları deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği kurumun isimlendirme prosedürüne bağlı kalınarak verilmiştir. Numunelere verilen kodlardan;

- 19: alüminyum oksit,
- 36: Tribaloy 400,
- 37: tungsten karbür,
- 38: krom karbür,
- AN: akımsız nikel,
- K: sert krom,
- HVOF: yüksek hızlı oksit-yakıt tungsten karbür,
- 36L: lazerle sırlanmış Tribaloy 400,
- 19AN: akımsız nikel kaplanmış alüminyum oksit,
- 36AN: akımsız nikel kaplanmış Tribaloy 400,
- 37AN: akımsız nikel kaplanmış tungsten karbür,
- 38AN: akımsız nikel kaplanmış krom karbür kaplamaları ifade etmektedir.

#### 3.4.1. Görünüş ve yapışma

Görünüş testinde kaplamalar çıplak gözle incelenerek düzgün üniform yapıda olması, kaplama yüzeyinde tabakalaşma, kalkma, çatlama vb. olup olmadığı yönünden kontrol edilmiştir. Yapışma testinde ise krom ve akımsız nikel kaplamalı kuponlar mengeneyle bağlanarak kopana kadar ileri geri hareket ettirilmiş ve kopma yeri 5X büyütme büyüteç ile incelenmiştir. Yapışma testi sonucunda ana malzemedan ayrılma, kabarma ve pullanma görülmemektedir. Termal sprey kaplamaların tutunma özelliklerini belirlemek için 3.4.5.'te verilen çekme testi yapılmıştır.

### 3.4.2. Yüzey pürüzlülüğü

Diavite DH-5 portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak numunelerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

### 3.4.3. Kalınlık

Kaplama kalınlıkları düz uçlu mikrometre ve Wilson/Tucon Series 200 mikrosertlik/kalınlık ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kalınlık ölçümleri ASTM B 487-85'e göre gerçekleştirilmiştir.

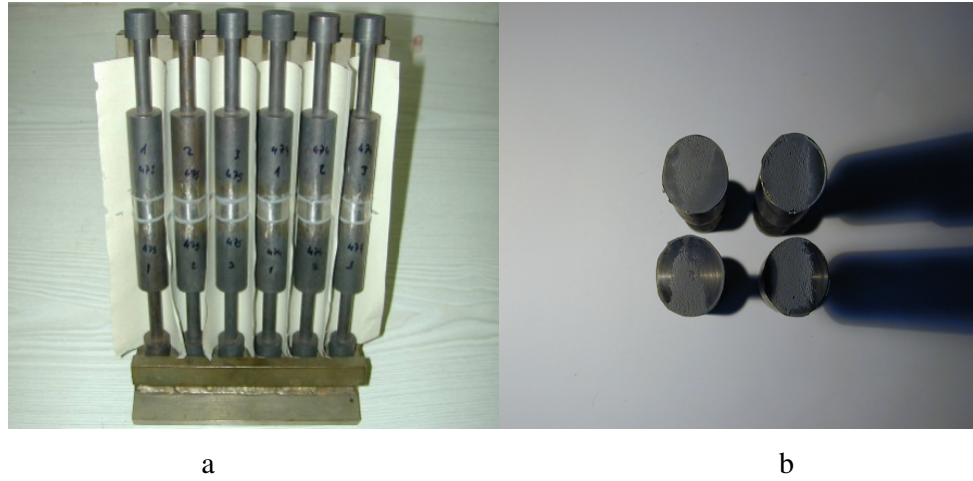
### 3.4.4. Sertlik

Kalibreli bir mikrosertlik cihazı kullanılarak Knoop veya Vickers elmas uçları ile 10–1000 gr arasında uygulanan yükün metalografik olarak hazırlanmış numune yüzeyine baskı yaparak iz bırakması ve bu izin diyagonalinin hesaplanması ile mikrosertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik değerleri Wilson/Tucon Series 200 cihazı ile ölçülmüştür. Termal spreyci kaplama prosesinin doğası gereği ölçüm değerleri arasındaki fark büyük olduğundan, her bir kaplama katmanı için 5 ölçüm yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Her bir ölçüm sonrasında oluşan iz durumu

değerlendirilmiş, boşluk, çatlak vb. mikroyapı bileşenlerinin etkisiyle doğru şekilde oluşmayan izler geçersiz kabul edilerek ölçümler yinelenmiştir.

### 3.4.5. Çekme testi

Kaplamanın ana metal veya diğer kaplama katmanlarıyla olan tutunma özelliklerini belirlemek için ASTM C 633 esas alınarak çekme testi gerçekleştirilmiştir. Termal sprej ve krom kaplamalı test kuponları istenilen mukavemet değerine göre yapıştırıcı kullanılarak tutucu aparata yerleştirilmiş ve seçilen yapıştırıcının türüne göre belirlenen sıcaklıkta 2–4 saat fırınlanmıştır. Hazırlanan çekme test numunesi uygun aparatlarla çekme test cihazına takılmış her bir numuneye 1000 psi/dakika kuvvet uygulanarak çekme işlemine başlanmış ve test numunesi kopana kadar işleme devam edilmiştir. Aşağıda çekme numunelerinin deney öncesindeki ve sonrasında ki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme numunelerinin: a) deney öncesi, b) deney sonrası görüntüleri

### 3.4.6. Mikroyapı analizi

Kaplamanın ana metalle ve diğer kaplama katmanlarıyla olan birleşme bölgelerinde ve her katmanın kendi içindeki içyapı özelliklerini, kusurlarını,



kaplamaların yapısal bütünlüklerini gözlemleyebilmek için mikroyapı analizleri yapılmıştır. Uygun metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulan numuneler (kesme, kalıplama, temizleme, parlatma) kaplama içerisinde ki boşluklar, kalıntılar, oksitler, ayrılmalar, pullanmalar, mikroçatlaklar vb. yönünden Nikon marka Optiphot 100 model optik mikroskop ve birlikte çalışan Nikon Ds Fi-1 CCD sensörlü kamera kullanılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.3. Nikon Optiphot 100 model optik mikroskop

#### **3.4.7. Aşınma testi**

Kaplamanın aşınma dayanımını gözlemek amacıyla aşınma testi yapılmıştır. Test Taber 5131 aşınma cihazıyla, CS-17 aşındırıcı ve 1000 g yük kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Kaplamanın işlem öncesi ve sırasıyla 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 ve 10000 çevrimde ki ağırlıkları ölçülmüştür.



Şekil 3.4. Taber 5131 aşınma test cihazı

### **3.4.8. Korozyon Testleri**

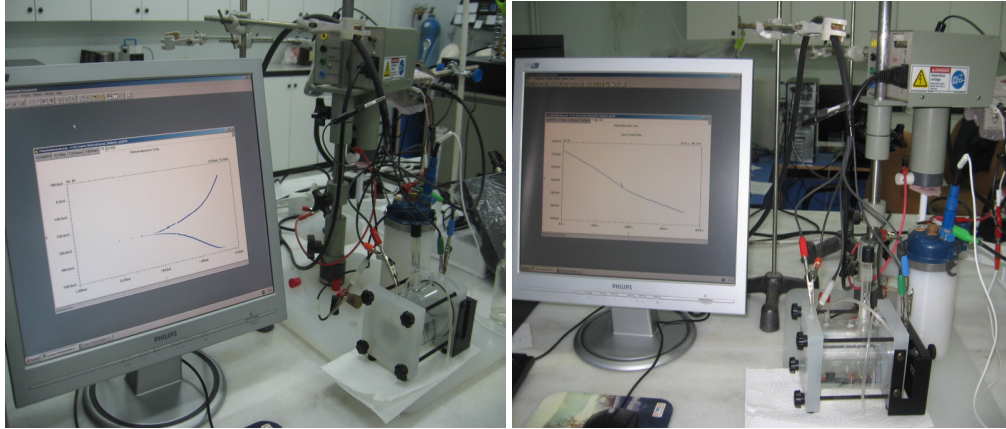
Kaplamaların korozyon performansının değerlendirilmesi amacıyla elektrolitik korozyon, daldırma ve tuz testi yapılmıştır.

#### **3.4.8.1. Elektrolitik korozyon testi**

0,1 N HCl çözeltisi hazırlanarak galvanostat / potansiyostat cihazında korozyon akım değerleri ve akım - potansiyel eğrileri elde edilmiştir. Numune, açık bir silindirik hücreye aparatla sabitlenmiş ve hücre korozif ortam çözeltisi ile doldurulmuştur. Numune, hücre içerisinde çalışma elektrodu görevi yapmıştır. Platin referans elektrot numune üzerinde homojen bir akım dağılımı sağlaması amacıyla, doymuş kalomel (+1

değerlikli civa klorür) referans elektrot ise potansiyel ölçümü amacıyla (SCE) kullanılmıştır. Polarizasyon testleri bir bilgisayar ile kontrol edilen Gamry Instrument'e ait potansiyostat / galvanostat ile gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon eğrisi -2,00 V ve +1,00 V arasında 1 mV/s tarama hızı ile elde edilmiştir.

Sonuçlar akım potansiyel eğrileri üzerinde gösterilmiştir ( $E\text{-log } I$ ). Korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $i_{corr}$ ), potansiyel ile anodik ve katodik korozyon akımının logaritması arasında lineer bir bağıntı olduğunu kabul eden Tafel yasasına göre hesaplanmıştır. Deneysel olarak belirlenen anodik ve katodik Tafel eğrilerinin çizgisel olan kısımlarının uzatılmasıyla kesim noktalarından o sistem için korozyon hızı ve potansiyeli belirlenmiştir (Bolelli et all, 2006 b; Üneri, 1998 ).



Şekil 3.5. Galvanostat/potansiyostat

### **3.4.8.2. Daldırma testi**

Numunelerin 1N HCl çözeltisinde 1 hafta bekletilmesiyle ASTM F 483'e uygun olarak daldırma testleri gerçekleştirilmiştir. Ön temizleme işlemleri yapılarak hazırlanan numunelere sadece kaplamalı yüzey açıkta kalacak şekilde maskeleme yapılmış ve kaplamalı numunenin yüzey alanının  $\text{cm}^2$ 'si başına 8 ml şeklinde hazırlanan 1 N HCl solüsyonu aynı kaplamaya sahip parçalar aynı cam kapta olacak şekilde

konulmuştur. Test oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde ve 24 ile 168 saat sonrasında ağırlık ölçümleri yapılarak, korozyon hızları belirlenmiş ve test kuponlarının 1 N HCl solüsyonundan ne kadar etkilendiği değerlendirilmiştir.

### **3.4.8.3. Tuz testi**

Kaplamaların % 5'lik tuz sisi içerisindeki korozyon davranışlarını gözlemek amacıyla ASTM B 117 standardına göre Şekil 3.6.'da görülen cihaz kullanılarak tuz testi gerçekleştirilmiştir.



a



b

c

Şekil 3.6. Tuz test cihazı: a) dıştan görünüm, b) tuz sisi, c) içerisinde test kuponları.

Uygun şekilde temizlenen numuneler, dikey eksenle 15–30° açı sağlayacak şekilde aparata yerleştirilmiştir. ASTM D 1193 Tip IV'e uygun deiyonize su ile hazırlanan % 5'lik tuz çözeltisi sise dönüşerek kabin içerisine dolmuştur. Numuneler cihazın içerisinde 100 saat süreyle kalmıştır. Bu sürenin sonunda test kuponlarının görüntüleri alınmış ve ASTM B 537'ye göre korozyon hızları değerlendirilmiştir.

#### 4. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş sonuçlar üzerinde durulacaktır. Test kuponlarına uygulanan kaplamalar ve bu kaplamaların özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan modifikasyonlar ve sonuçları ile Bölüm 3’de verilen bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilen

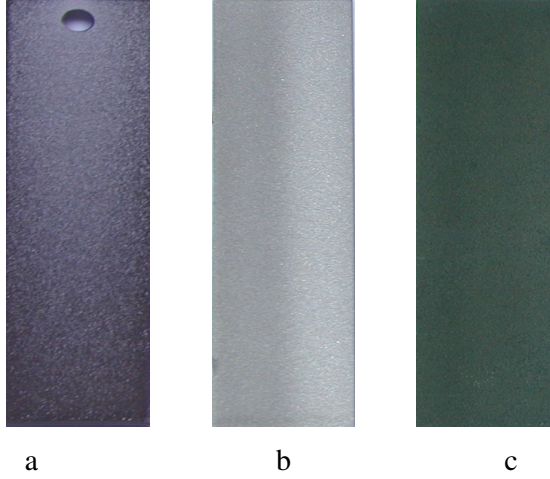
- Görünüş ve yapışma,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Kalınlık,
- Mikrosertlik,
- Çekme testi,
- Mikroyapı analizi,
- Aşınma testi,
- 0,1 N HCl içerisinde elektrolitik korozyon testleri,
- 1 N HCl içerisinde daldırma testi,
- Tuz testlerinin

sonuçları verilerek, yorumlanmıştır. Sonuçların yorumlanmasında; numuneler arasında kıyaslama ve literatürde daha önce elde edilmiş sonuçlardan yararlanılmıştır.

##### 4.1. Uygulanan Kaplamalar

Bölüm 3’de verildiği şekilde krom, akımsız nikel ve termal sprej kaplamalar, A286 ana malzemedeki test kuponları üzerine uygulanmıştır. Alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbür kaplamalar atmosferik plazma sprej (APS), WC-10Co-4Cr kompozisyonundaki kaplama da yüksek hızlı oksijen yakıt sprej

(HVOF) yöntemleri ile kaplanmıştır. Şekil 4.1.'de krom ve plazma sprej kaplamalı test kuponları görülmektedir.



Şekil 4.1. Kaplamalı test kuponları: a)Elektrolitik krom, b)Tribaloy 400, c)krom karbür (2,5 x 10 cm boyutlarında)

## 4.2. Kaplamalara Uygulanan Modifikasyonlar

Özellikle termal sprej kaplama uygulamasıyla elde edilen son yüzey, pürüzlü ve porozitelere sahip olduğundan sıklıkla yüzeye makineleme, sızdırmazlık sağlamak için reçine ya da vaks uygulaması gibi bir son işlem yapılması gerekmektedir. Gerekli olduğu durumlarda da son kaplama difüzyonu, nitratlama, sıcak izostatik presleme veya bilyeli dövme gibi özel yöntemlerde uygulanabilmektedir (Sulzer Metco, 2010). Bu bölümde kaplama özelliklerini iyileştirmek amacıyla denenen modifikasyonlar anlatılmıştır.

### 4.2.1. Nikel kaplama üzerine codep uygulamasının değerlendirilmesi

Nikel ve kobalt esaslı malzemelere uygulanan difüzyon kaplama prosesi ile nikel kaplamalı parçalarda da alüminyum difüzyonu ile yüzeyin sertleşeceği

düşünülmüş, ancak difüzyon kaplama prosesi sonrasında olumlu sonuç elde edilememiştir.

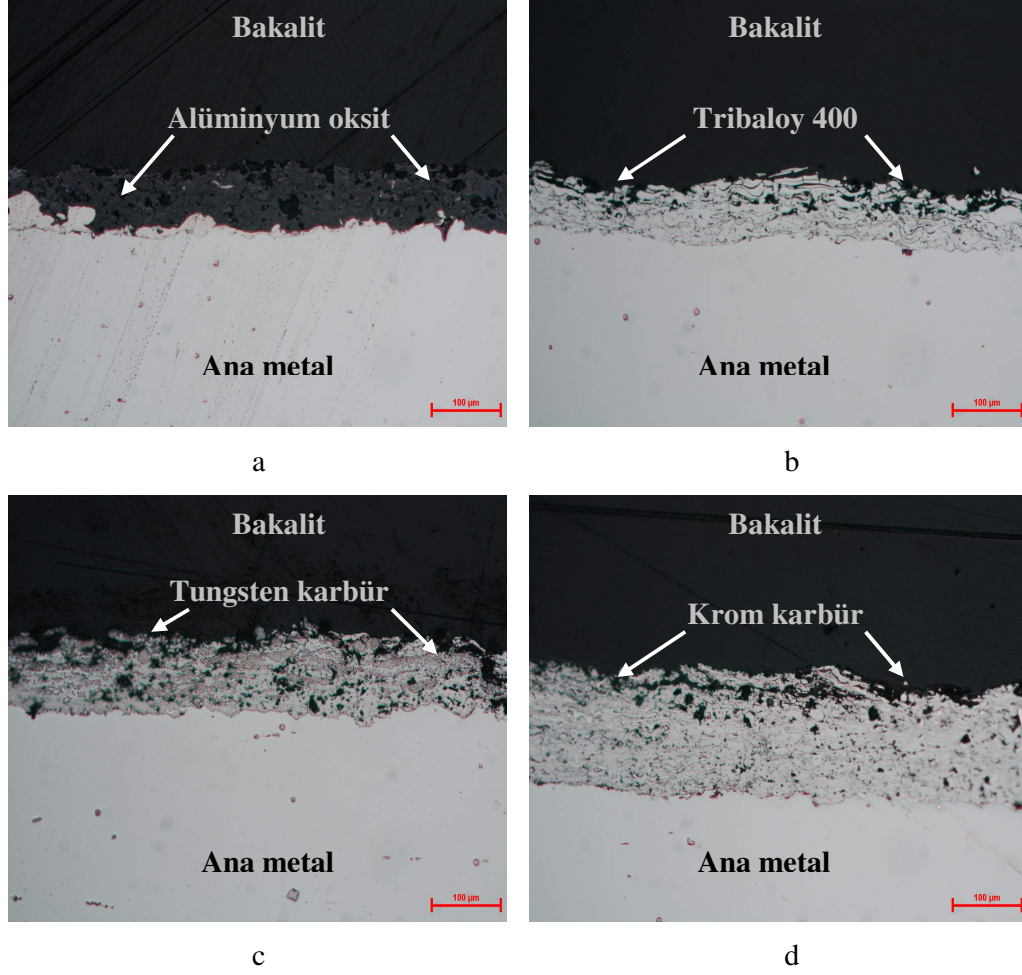


Şekil 4.2. Codep uygulanmış nikel kaplamalı kuponlar

#### **4.2.2. Sprey kaplamalara bilyeli dövme uygulamasının değerlendirilmesi**

Uygulama ile hedeflenen bilyeli dövmenin yüzeyi sıkıştırması ya da kaplamadaki porozitelerin uçlarını almasıyla aşınma dayanımının artmasıdır. Ancak bilyeli dövme sonucunda test kuponlarının yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra ağırlık ve kalınlık değerlerinde de azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4.3.'de verilen mikroyapılarda da herhangi bir sıkışma gözlenmediği, hatta kaplama yüzeyinde kırılmalar, girinti ve çıkıntılarda kopmalar olduğu görülmektedir.

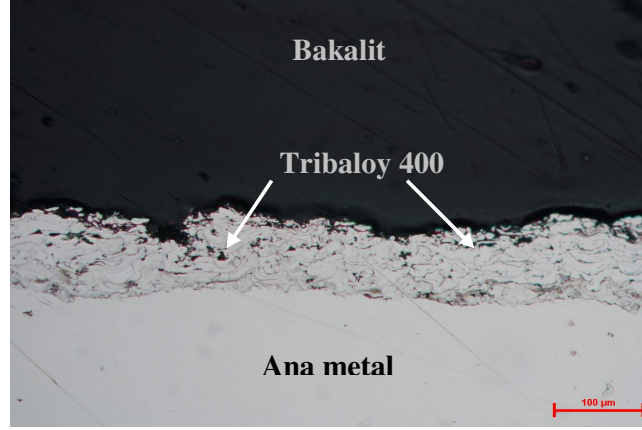




Şekil 4.3. Bilyeli dövme uygulanmış kuponların mikroyapıları: a)Alüminyum oksit, b)Tribaloy 400, c) tungsten karbür, d)krom karbür.

#### 4.2.3. Sprey kaplamalara karbürizasyon uygulamasının değerlendirilmesi

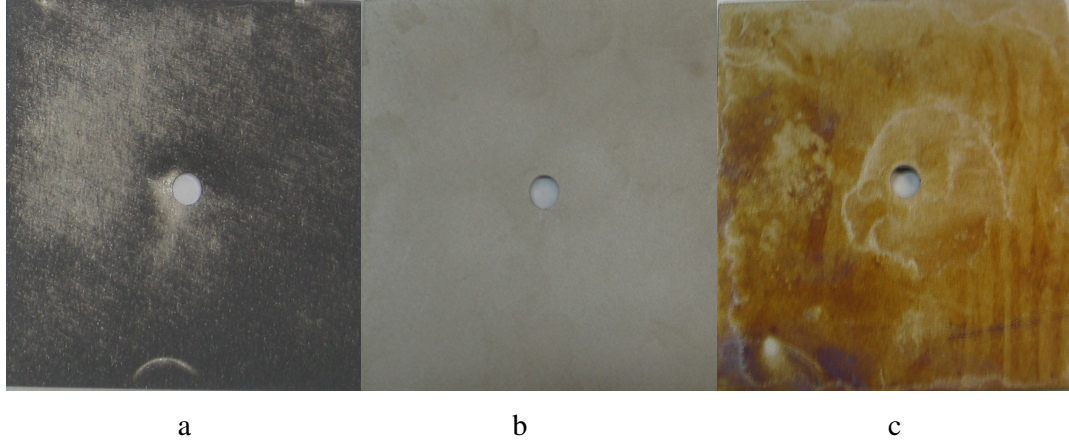
Co-28Mo-8Cr-2Si kompozisyonuna sahip plazma sprej test kuponlarına, malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi için kullanılan karbürizasyon yönteminin uygulanmasıyla hedeflenen gerçekleştirilecek bir karbürizasyon ile kaplama yüzeyinin sertleşebileceğidir. Ancak Şekil 4.4.'te ki mikroyapıda da görüldüğü gibi karbürizasyon gerçekleşmemiştir.



Şekil 4.4. Karbürizasyon uygulanmış Tribaloy 400 kuponunun mikroyapı resmi

#### 4.2.4. Sprey kaplamalar üzerine akımsız nikel uygulamasının değerlendirilmesi

Termal sprej kaplamaların yüzey boşluklarını doldurup daha az pürüzlü ve aşınma dayanımı yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek amacıyla termal sprej kaplamaların üzerine akımsız nikel uygulaması yapılmıştır. Sonrasında 400°C'de 1 saat fırınlanarak kaplamanın sertliği artırılmıştır.

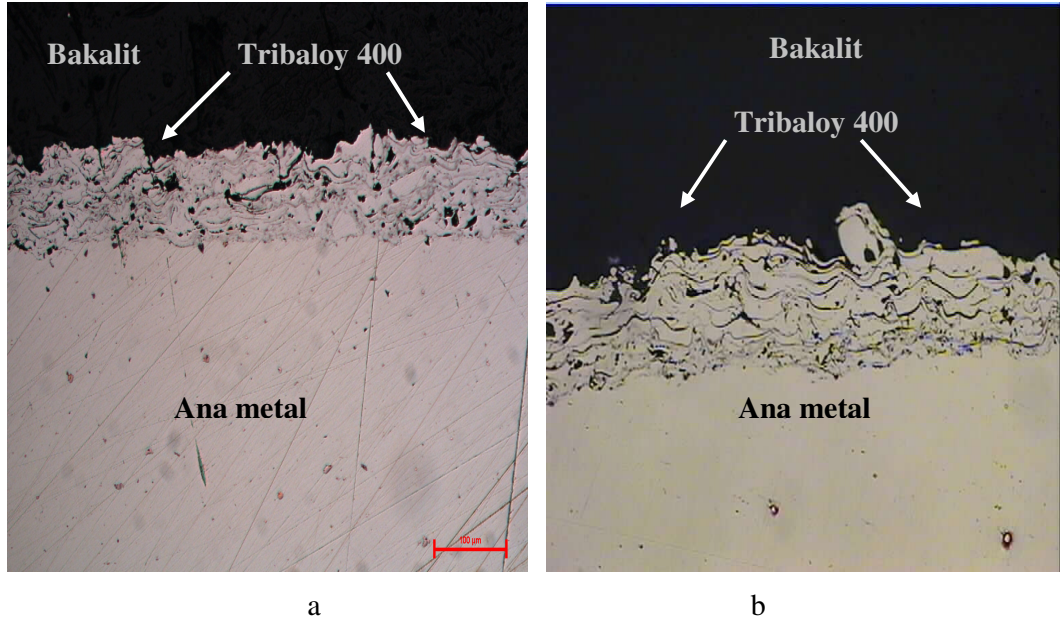


Şekil 4.5. Akımsız nikel uygulanmış: a) alüminyum oksit, b) Tribaloy 400 ve c) 400°C'de 1 saat ısı işlem uygulanmış krom karbür kuponları. (10 x 10 cm boyutlarında)

Alüminyum oksit kaplamalı kuponlarda Şekil 4.5. a'da görüldüğü gibi kısmi tutunma gerçekleşmiş, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbür kaplamalı kuponlarda ise akımsız nikel yüzeye daha iyi tutunmuş ve düzgün bir kaplama tabakası elde edilmiştir (Şekil 4.5. b). Kaplamayı serleştirmek için uygulanan ısıl işlem sonrasında da yüzeyde renk değişimleri görülmüştür (Şekil 4.5. c).

#### 4.2.5. Sprey kaplamalara lazer sırlama uygulamasının değerlendirilmesi

Lazer sırlama uygulanmasının amacı plazma spreyn porozitelerini azaltmaktır (Tondur et al, 2000). Lazer sırlama uygulanarak kaplama yüzeyinin yeniden ergitilip sinterlenmesi ile yüzeyde yoğun ve porozitesiz bir yapının oluşturulması hedeflenmiştir. Ancak Şekil 4.6.'da da görüldüğü gibi tam bir sinterlenme sağlanamamıştır.



Şekil 4.6. Tribaloy 400 lazer sırlama: a) uygulanmış, b) uygulanmamış

### 4.3. Test Sonuçları

Uygulanan testlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

#### 4.3.1. Görünüş ve yapışma

Görünüş ve yapışma testleri sonucunda test kuponlarına uygulanan kaplamaların üniform yapıda olduğu, kaplama yüzeylerinde tabakalaşma, kalkma, çatlama vb. olmadığı görülmüştür.

#### 4.3.2. Yüzey pürüzlülüğü

Ölçülen pürüzlülük değerleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numuneler için pürüzlülük ölçüm değerleri

NUMUNE	PÜRÜZLÜLÜK DEĞERİ ( $\mu\text{m}$ )	STANDART SAPMA
A286	3,79	0,38
K	3,60	0,42
19	5,93	0,56
36	6,20	0,73
37	7,10	0,58
38	5,13	0,36
HVOF	3,52	0,27
AN	2,80	0,36
19AN	6,26	0,52
36AN	4,75	0,39
37AN	4,97	0,34
38AN	4,64	0,43
36L	6,05	0,37

Pürüzlülük değerler Diavite DH-5 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak lt (travers uzunluğu) = 4,8 mm ve lc (cut off uzunluğu) = 0,80 mm olduğunda elde edilmiştir.

Çizelgede krom, akımsız nikel ve HVOF kaplamalarda pürüzlülük değerlerinin düşük, termal sprej kaplamalarda ise yüksek olduğu ve termal sprej kaplamalar üzerine kaplanan akımsız nikelin 36, 37 ve 38 numunelerinde, sadece plazma sprej uygulananlara kıyasla yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmektedir.

#### **4.3.3. Kalınlık**

Kaplama kalınlığı olarak 76,2-152,4 µm değerinin sağlanması hedeflenmiştir. Gerek termal sprej gerekse krom ve akımsız nikel kaplama prosesleri sonrasında düz uçlu mikrometre kullanılarak kalınlık ölçümleri alınmıştır. İlaveten özellikle girintili çıkıntılı yüzeylere sahip olan plazma sprej kaplamaların gerçek kalınlıklarını tespit etmek amacıyla mikroyapı numuneleri hazırlanarak kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde Wilson/Tucon Series 200 mikrosertlik/kalınlık ölçüm cihazı kullanılmıştır. ASTM B 487-85'e göre gerçekleştirilen kalınlık ölçümlerinde Çizelge 4.2.'de verilen sonuçlar alınmıştır.

Çizelge 4.2.'de akımsız nikelin kaplama kalınlığının istenilen kalınlık değerinin altında olduğu görülmektedir. Yüksek yüzey sertliği ve düzgün yüzeyi ile iyi bir krom kaplama alternatifi olan akımsız nikel kaplamanın önemli bir sorunu ince bir kaplama olmasıdır.

Plazma sprej üzerine uygulanan akımsız nikellerin kalınlığı incelendiğinde ise en yüksek kalınlığa tungsten karbür (37), ardından da sırasıyla krom karbür (38), Tribaloy 400 (36) ve alüminyum oksit (19) numunelerinde ulaşıldığı görülmektedir.

Alüminyum oksit numunelerde kısmi tutunma görüldüğünden kalınlık ölçüm değeri akımsız nikelin tutunduğu bölgelerdeki kalınlığı göstermektedir.

Çizelge 4.2. Numuneler için kaplama kalınlıkları

NUMUNE		ORTALAMA KAPLAMA KALINLIĞI ( $\mu\text{m}$ )
<b>K</b>		104,83
<b>19</b>	T	70,28
	B	16,26
<b>36</b>		78,76
<b>37</b>		99,22
<b>38</b>		143,6
<b>HVOF</b>		92,56
<b>AN</b>		51,50
<b>19AN</b>	AN	12,14 <sup>*</sup>
	19	68 <sup>**</sup>
<b>36AN</b>	AN	26,25
	36	84,1 <sup>**</sup>
<b>37AN</b>	AN	46,06
	37	127,30 <sup>**</sup>
<b>38AN</b>	AN	36,16
	38	97,40 <sup>**</sup>
<b>36L</b>		97,48 <sup>**</sup>

\* : 19AN'nin akımsız nikeli için kaplama kısmi olarak tutunmuştur, tablodaki değer kaplamanın tutunduğu bölgeler için ortalamadır.

\*\* : 19AN, 36AN, 37AN, 38AN ve 36L numuneleri 19, 36, 37 ve 38 kodu ile verilenlerden farklı olarak, ikinci bir parti ile tekrar edilen termal spreyc uygulaması sonucunda elde edilmiştir.

Tribaloy 400'e uygulanan lazer sırlama işlemi ile kaplama kalınlığında değişiklik meydana gelmemiştir. Buda sırlama sonucu oluşan tabakanın optik mikroskopla belirlenemeyecek kadar ince olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

#### **4.3.4. Sertlik**

Sertlik değerleri 100 gram yükte Vickers olarak ölçülmüş ve ortalama değerler Çizelge 4.3.'te verilmiştir. İnce akımsız nikel kaplamalarda sertlik ölçümü için 100 gram yük kullanılmıştır, sonrasında tüm numunelerin karşılaştırılabilir olmasını sağlamak amacıyla diğer ölçümler de aynı yükte gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Wilson/Tucon Series 200 mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Uygulanan tüm kaplamaların mikrosertlik değerlerinin verildiği Çizelge 4.3. incelendiğinde en yüksek sertlik değerine HVOF tungsten karbür uygulanmış test kuponlarında ulaşıldığı, sonrasında ise sırasıyla tungsten karbür, akımsız nikelli numuneler, krom karbür, alüminyum oksit, krom ve Tribaloy 400'ün geldiği görülmektedir.

Krom kaplamanın sertliğindeki düşüklüğe hidrojen giderme işleminin neden olduğu düşünülmektedir. Krom kaplamada elde edilen yüksek sertlik yapıya adsorbe olan atomik hidrojen ile ilişkilidir ve yapılan müteakip ısıl işlem esnasında, meydana gelen kısmi hidrojen çıkışı nedeniyle, kaplama sertliğinde azalma, süneklikte ise bir miktar artış meydana gelmektedir (Bolelli et all, 2006 b).

Akımsız nikel kaplanın sertlik ve aşınma dayanımı özelliklerini iyileştirmek için uygulanan ısıl işlem (Baudrand, 1994) sonucunda akımsız nikel kaplama Çizelge 4.3.'de verilen değere ulaşmıştır.

Çizelge 4.3. Tüm test kuponları için sertlik değerleri

NUMUNE		ORTALAMA SERTLİK DEĞERLERİ HV 0,1
<b>K</b>		662,27
<b>19</b>		695,34
<b>36</b>		484,93
<b>37</b>		932,98
<b>38</b>		772,92
<b>HVOF</b>		1239,2
<b>AN</b>		740,3
<b>19AN</b>	AN	-
	19	797,66
<b>36AN</b>	AN	802,6
	36	433,53
<b>37AN</b>	AN	794,63
	37	744,62
<b>38AN</b>	AN	781,9
	38	506,02
<b>36L</b>		438,42

#### 4.3.5. Çekme testi

Çizelge 4.4.'te krom ve termal spreyl kaplamalar için çekme testi değerleri verilmiştir. Krom, alüminyum oksit, Tribaloy 400 ve HVOF tungsten karbür kaplamalar çekme testi esnasında yapıştırıcıdan koptuğu için, yapıştırıcının mukavemet değeri olan 10.000 psi'nin üzerinde çekme değerine sahip oldukları değerlendirilmiştir. Tungsten karbür ve krom karbür kaplamalar içinse çekme mukavemeti değerleri çizelgede görüldüğü gibi bir miktar daha düşüktür.

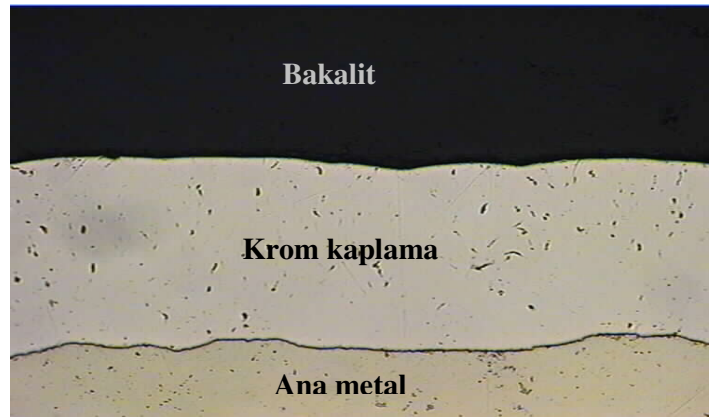


Çizelge 4.4. Krom ve termal spreylere kaplamalar için çekme değerleri

Kaplama cinsi	Çekme test değeri ( psi )		
	1	2	Ortalama
Krom kaplama	>10000	>10000	>10000
Alüminyum oksit kaplama	>10000	>10000	>10000
Tribaloy 400 kaplama	>10000	>10000	>10000
Tungsten karbür kaplama	7401,888	7716,384	7559,136
Krom karbür kaplama	9491,040	9311,328	9401,184
HVOF tungsten karbür kaplama	>10000	>10000	>10000

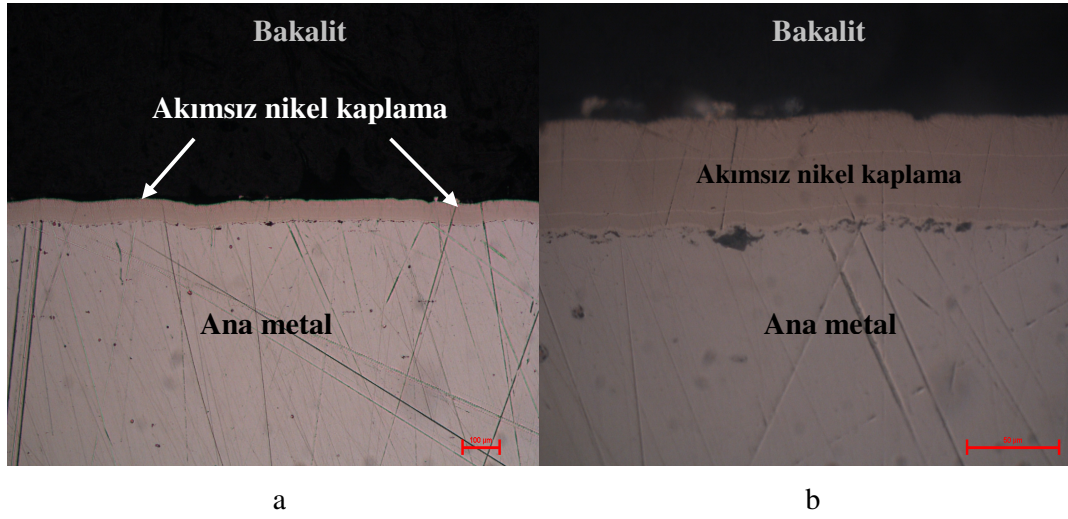
#### 4.3.6. Mikroyapı analizi

Metaloğrafik hazırlama işlemlerine tabi tutulan numunelerin (kesme, kalıplama, temizleme, parlatma) kaplama içerisindeki boşluklar, kalıntılar, oksitler, ayrılmalar, pullanmalar, mikroçatlaklar vb. yönünden optik mikroskopla incelenmesiyle elde edilen görüntüler aşağıda ki resimlerde verilmiştir.

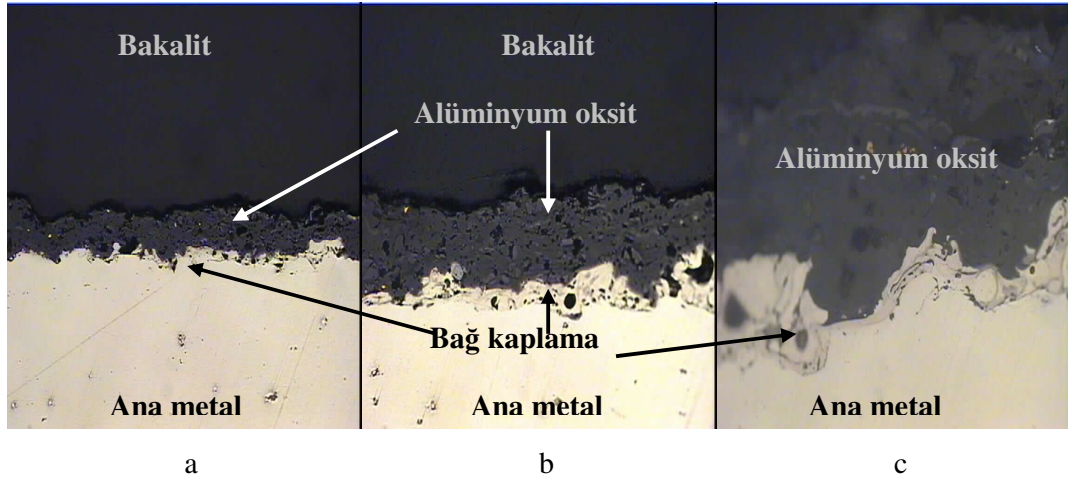


Şekil 4.7. Elektrolitik krom 200X büyütme

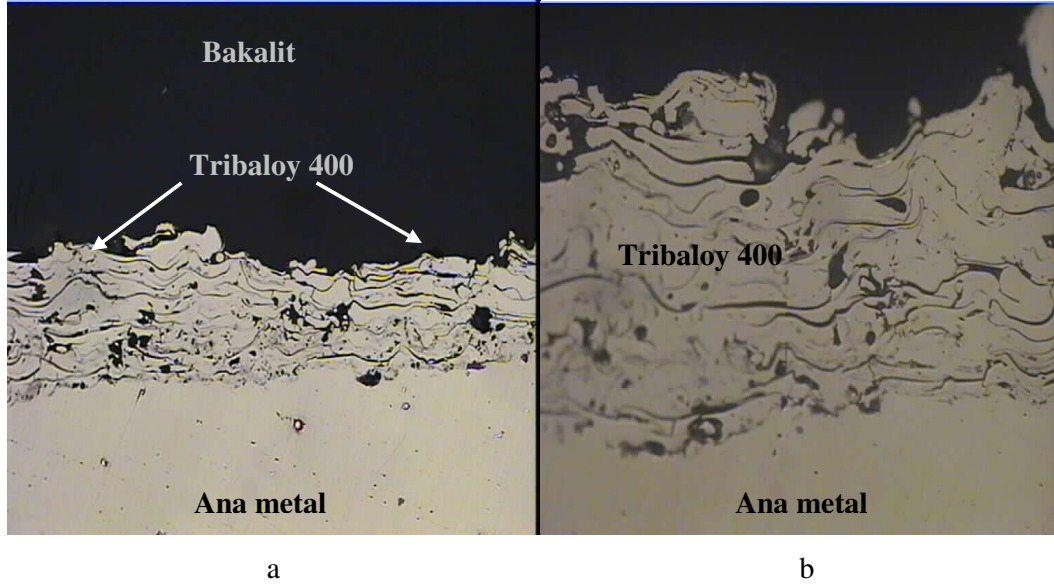
Şekil 4.7. ve 4.8.'de verilen elektrolitik sert krom ve akımsız nikel kaplamalar, ihmal edilebilir oranda porozite içeren, kimyasal yönden homojen metalik film tabakaları şeklinde gözlenmiştir. Tüm kaplanmış numunelerde ana metal ile kaplama arasında, yapısında hemen hemen hiç hata bulunmayan mükemmel ara yüzey görülmektedir.



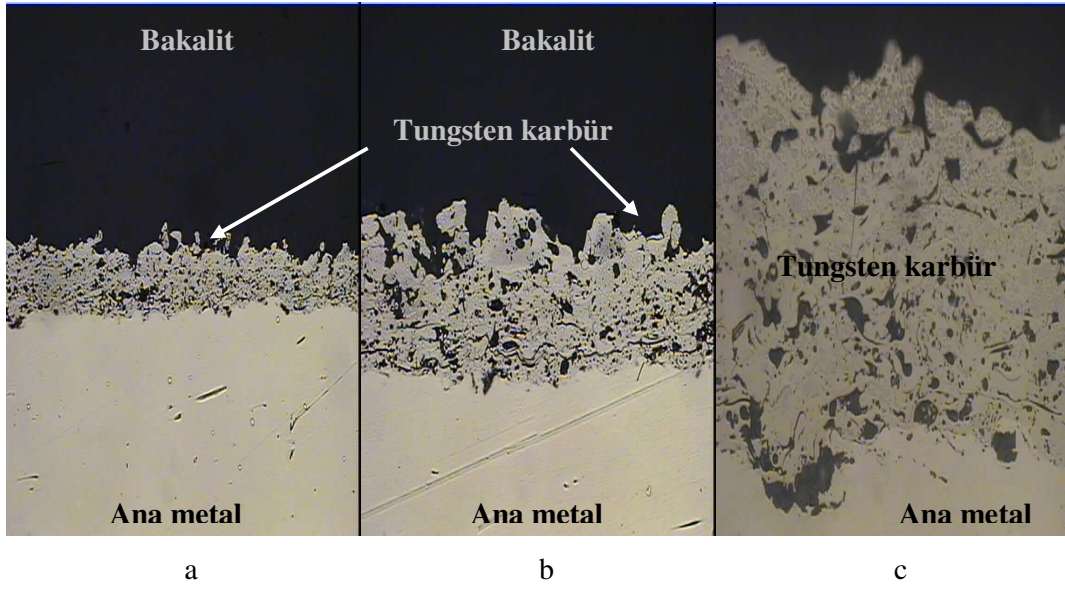
Şekil 4.8. Akımsız nikel: a) 100X ve b) 500X büyütme



Şekil 4.9. Alüminyum oksit: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme



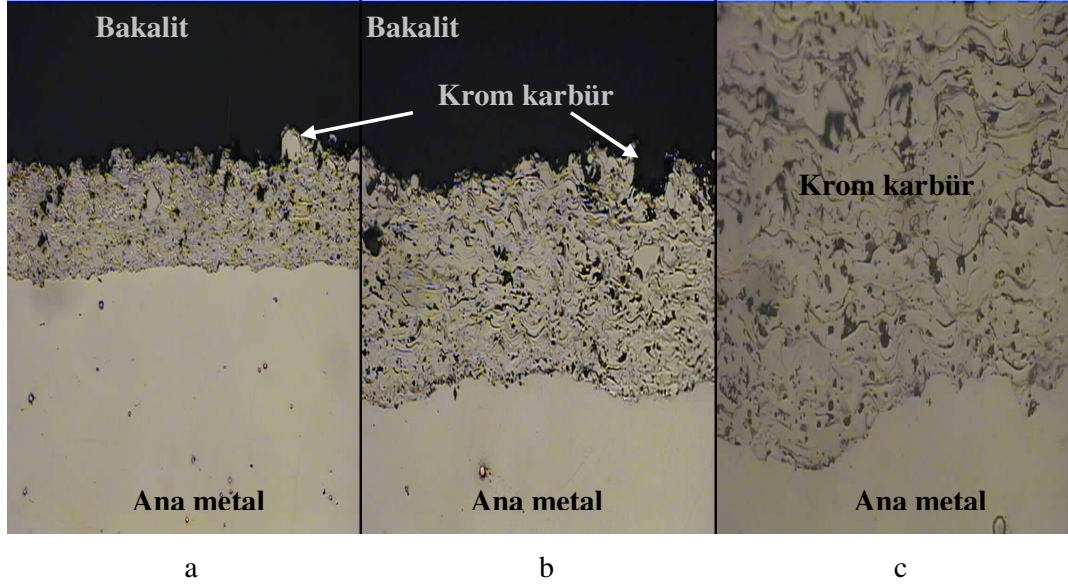
Şekil 4.10. Tribaloy 400: a) 200X ve b) 500X büyütme



Şekil 4.11. Tungsten karbür: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme

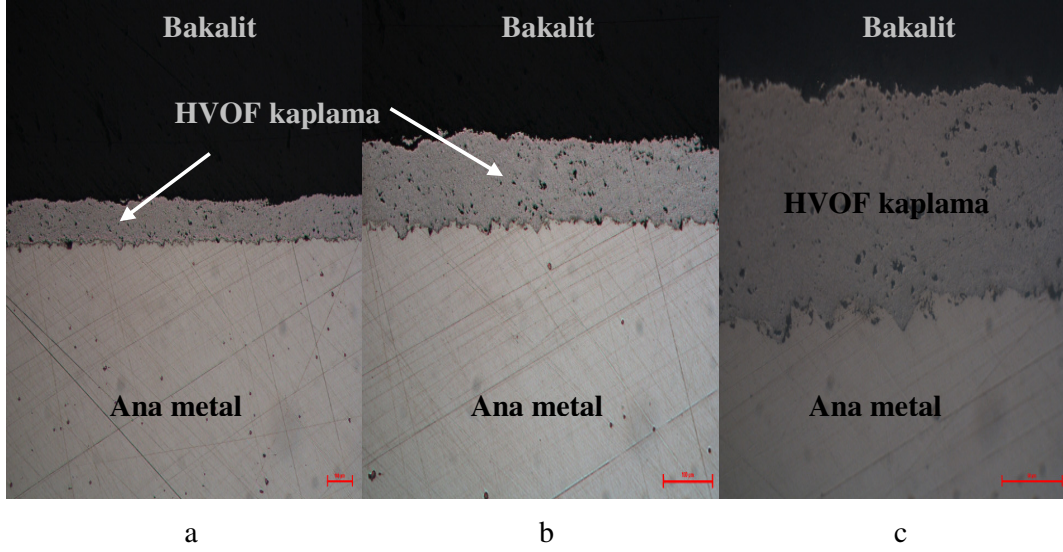
Şekil 4.9., 4.10., 4.11. ve 4.12.'de farklı büyütmelerde verilen plazma sprey numunelerinin mikroyapılarında ise girift kaplama yüzeyi, kaplama içerisinde boşluklar,

inklüzyonlar, oksitler görülmektedir. Boşluklar, ergimemiş parçacıklar ve inklüzyonlar proseten kaynaklanmaktadır. Termal sprey numunelerinde ergimiş yapıda bulunan Cr ve Si gibi yüksek oksijen afinitesine sahip elementler, kaplama uygulamasındaki uçuş ve yapışma sırasında meydana gelen oksitlenmenin ana sebebidir.

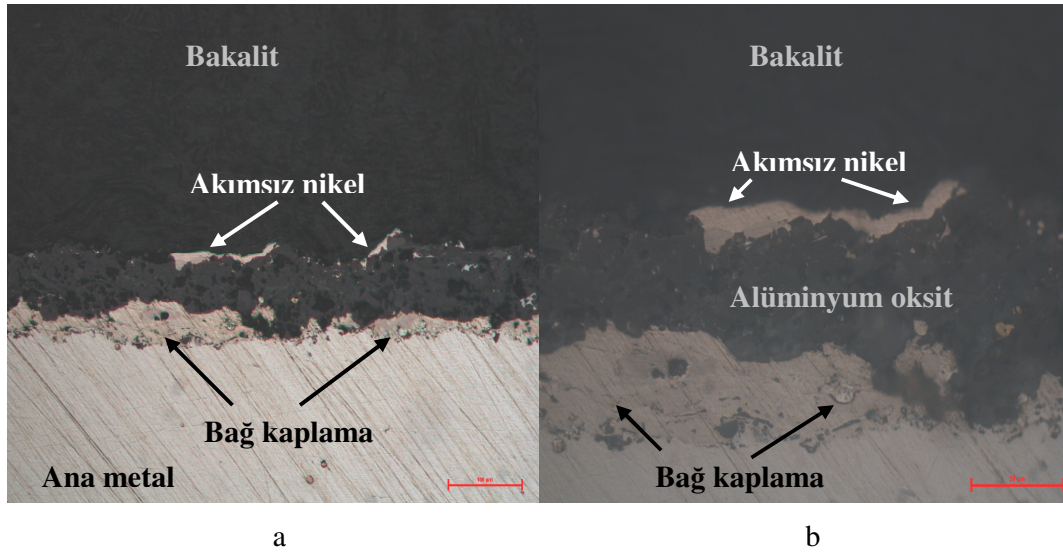


Şekil 4.12. Krom karbür: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme

HVOF sprey işlemi ile elde edilen daha yüksek hızlar ve daha düşük sıcaklık değerleriyle APS ile uygulanan sprey kaplamalara göre karbür fazı daha stabil kalabilmektedir. Şekil 4.13.'te HVOF yöntemiyle uygulanan WC-10Co-4Cr kompozisyonunda ki kaplama için farklı büyütmelerdeki mikroyapı resimlerinde bu görülebilmektedir. Kaplama daha yoğundur ve daha az porozite içermektedir. Şekil 4.13.'de ki HVOF tungsten karbür kaplama, gerek 4.11.'de verilen plazma sprey tungster karbür kaplama gerekse 4.9., 4.10. ve 4.12. 'de ki diğer plazma sprey kaplamalara kıyasla çok daha az porozite, ergimemiş parçacık, oksit ve inklüzyon görülmektedir ve kaplama yüzeyi daha az girintili çıkıntılıdır.

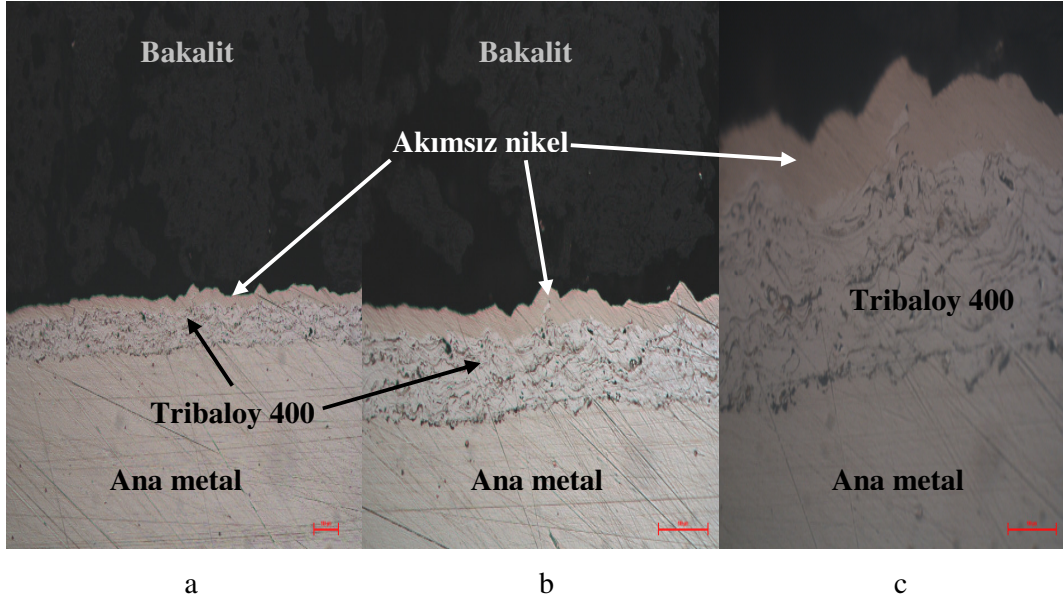


Şekil 4.13. Tungsten karbür HVOF: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme

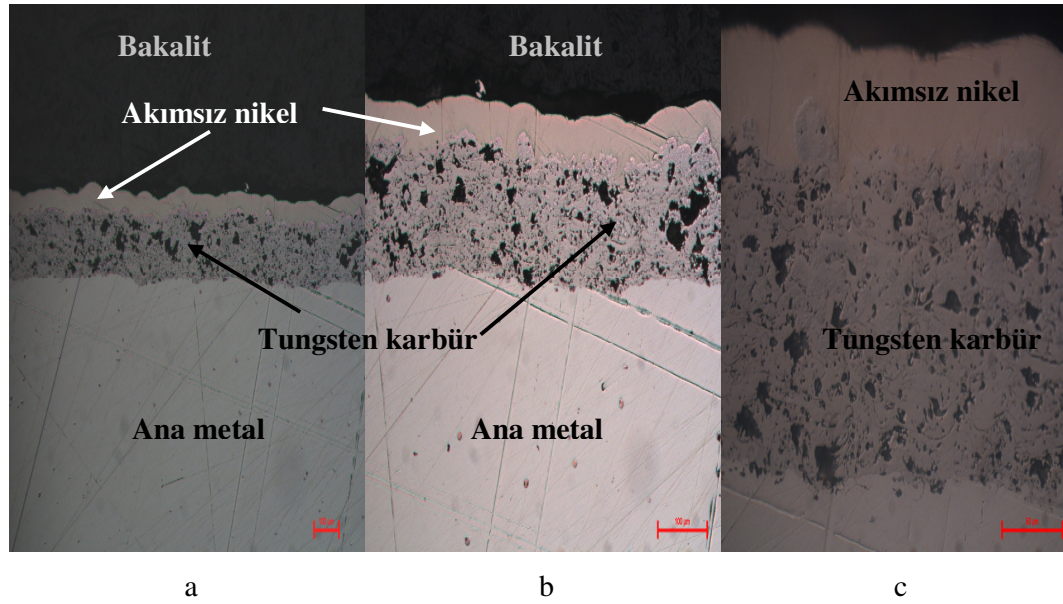


Şekil 4.14. Alüminyum oksit üzeri akımsız nikel: a) 200X ve b) 500X büyütme

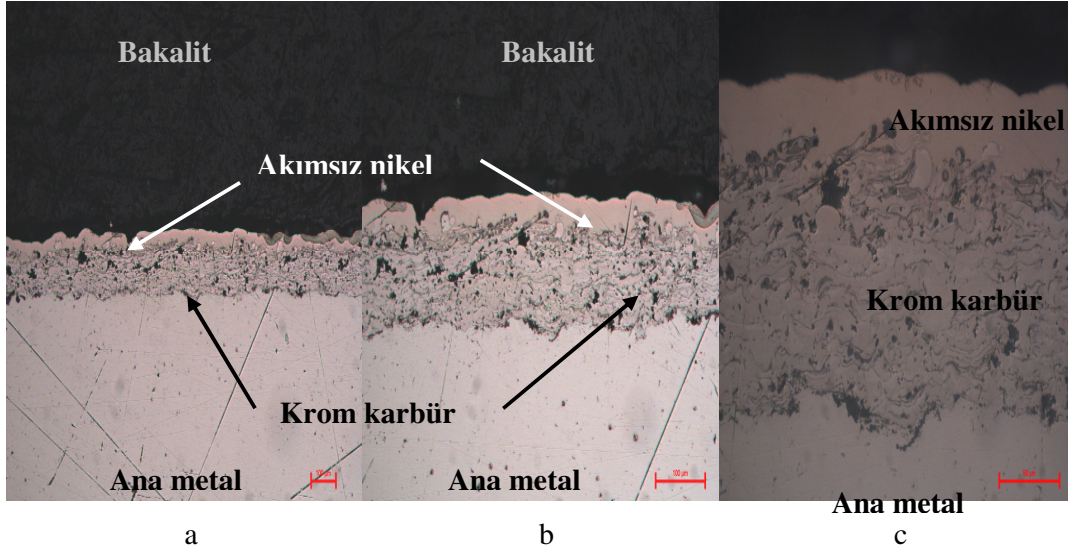
Şekil 4.14., 4.15., 4.16. ve 4.17.'de termal sprey kaplamalar üzerine uygulanan akımsız nikel ile yüzeydeki girinti ve çıkıntılarının bir oranda doldurulmasının mümkün olduğu görülmektedir. Ancak akımsız nikelin üzerine atıldığı termal sprey kaplamanın pürüzlülüğünü takip ettiği de mikroyapı resimlerinde açıkça görülmektedir.



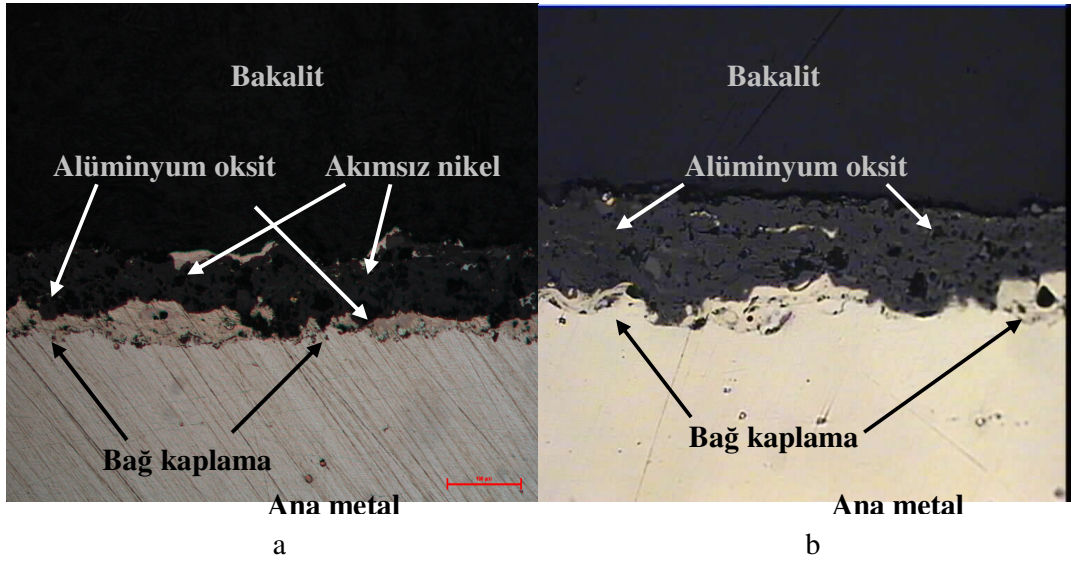
Şekil 4.15. Tribaloy 400 üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme



Şekil 4.16. Tungsten karbür üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme



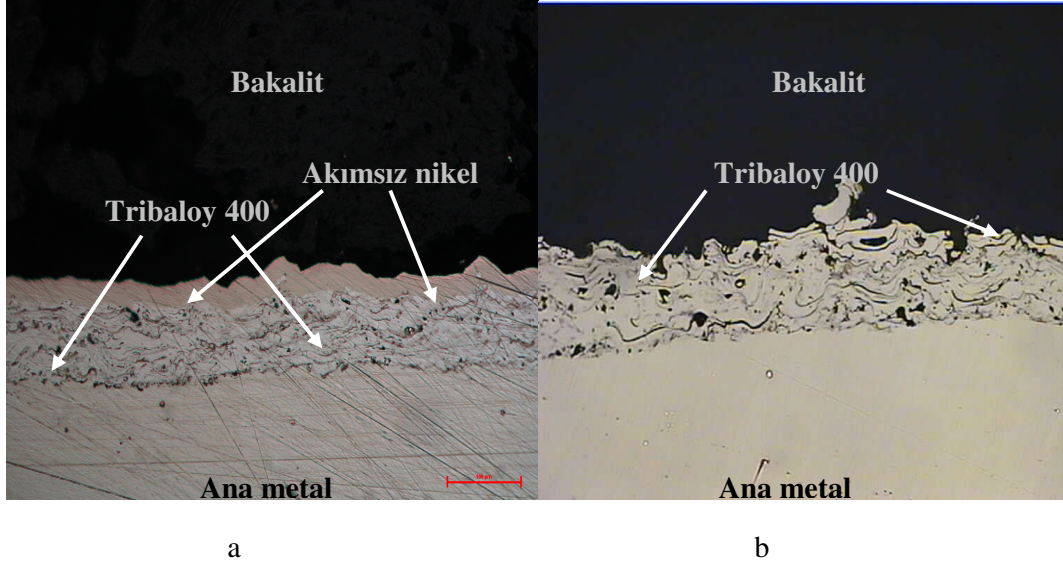
Şekil 4.17. Krom karbür üzeri akımsız nikel: a) 100X, b) 200X ve c) 500X büyütme



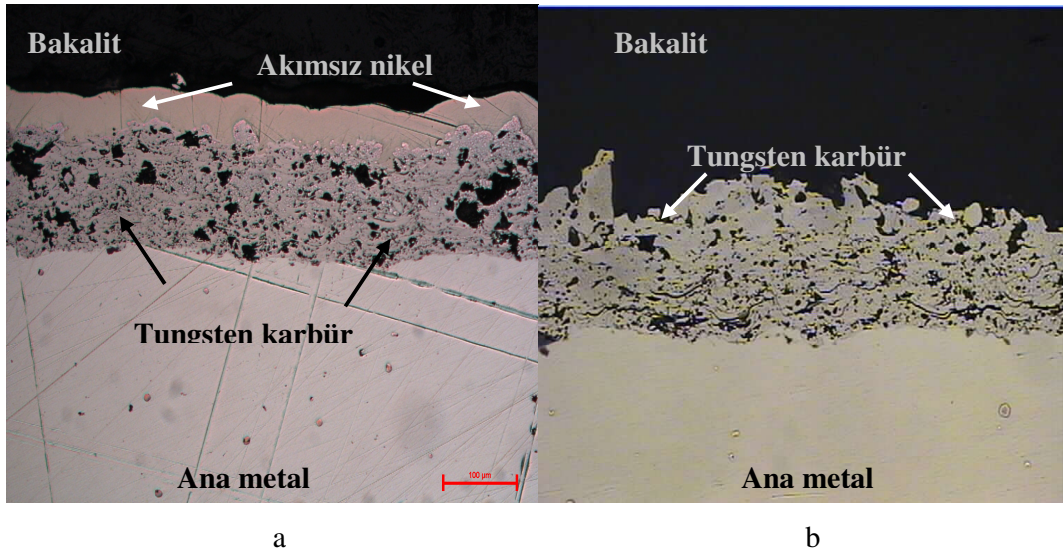
Şekil 4.18. Alüminyum oksit: a) akımsız nikel uygulanmış 100X, b) modifikasyonsuz 200X

Şekil 4.18., 4.19., 4.20. ve 4.21.'de akımsız nikel uygulanmış ve uygulanmamış kuponlar verilmiştir. Şekil 4.18.'de plazma sprey alüminyum oksit kaplama üzerine

uygulanan akımsız nikelin kısmi olarak tutunduğu, 4.19., 4.20. ve 4.21.'de ki mikroyapılar incelendiğinde ise bu termal spreycaplamalar üzerinde akımsız nikelin iyi bir tutunma gösterdiği ve kalınlık teşkil ettiği görülmektedir.

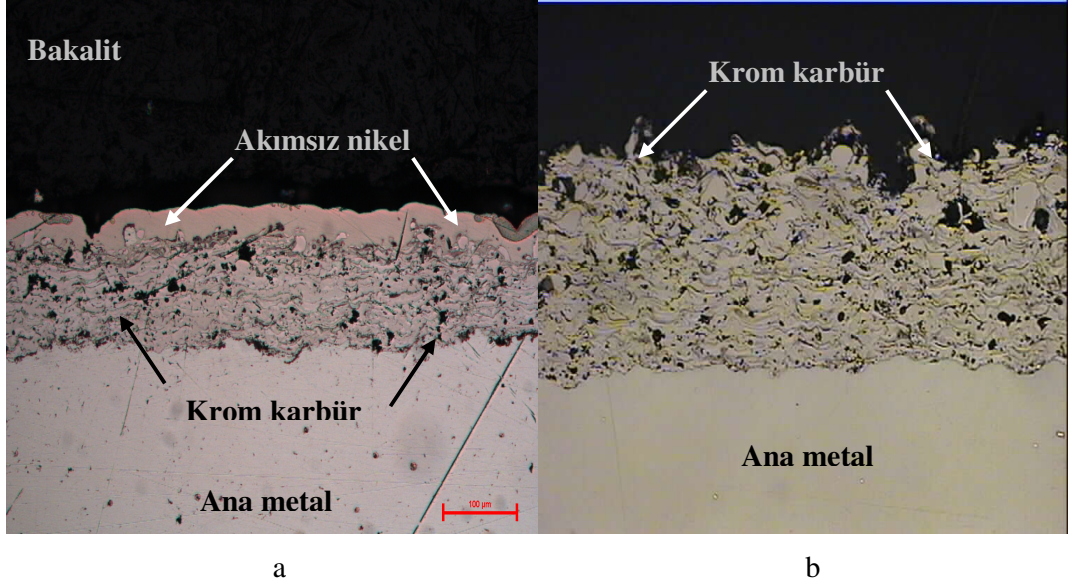


Şekil 4.19. Tribaloy 400 200X: a) akımsız nikel uygulanmış, b) modifikasyonsuz



Şekil 4.20. Tungsten karbür 200 X: a) akımsız nikel uygulanmış, b) modifikasyonsuz



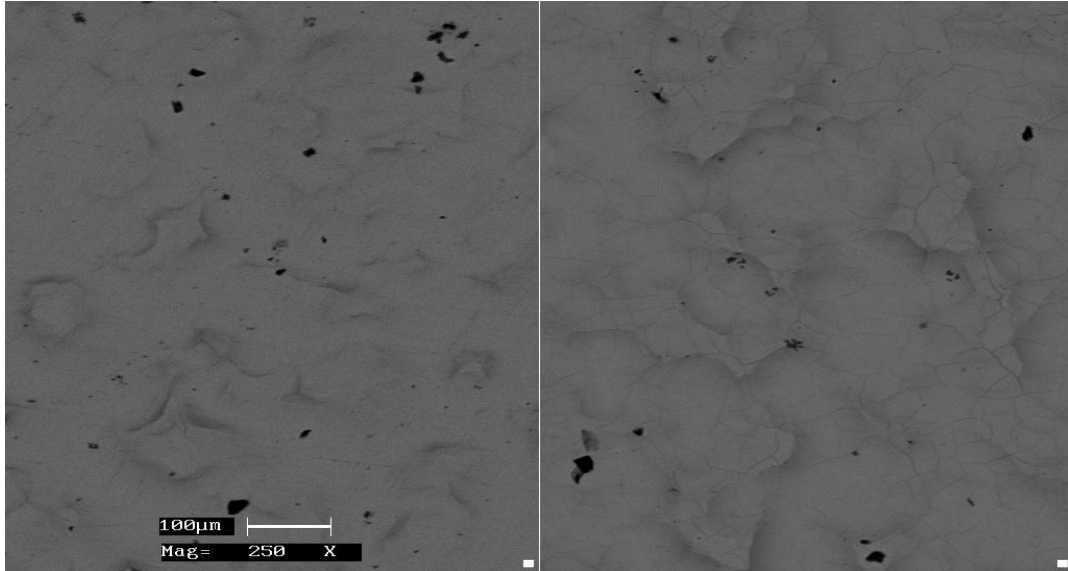


Şekil 4.21. Krom karbür 200X: a) akımsız nikel uygulanmış, b) modifikasyonsuz

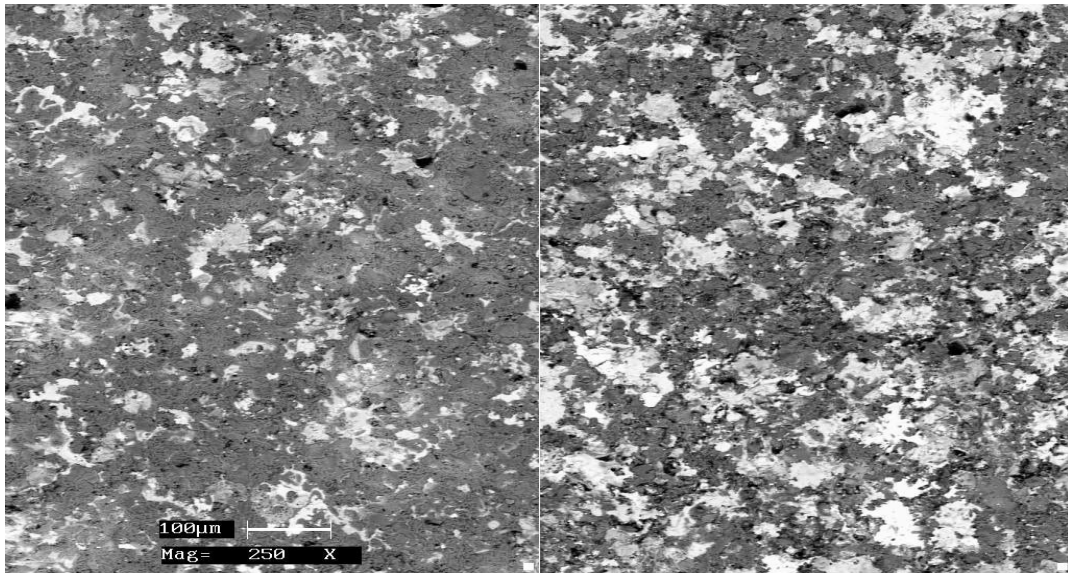
#### 4.3.7. Aşınma testi

Aşağıda ki resimlerde krom ve termal sprey kaplanmış kuponlar için sağ yarıda test kuponunun aşınmış bölümünün SEM resmi, sol yarıda ise aşınmamış bölümünün SEM resmi görülmektedir:

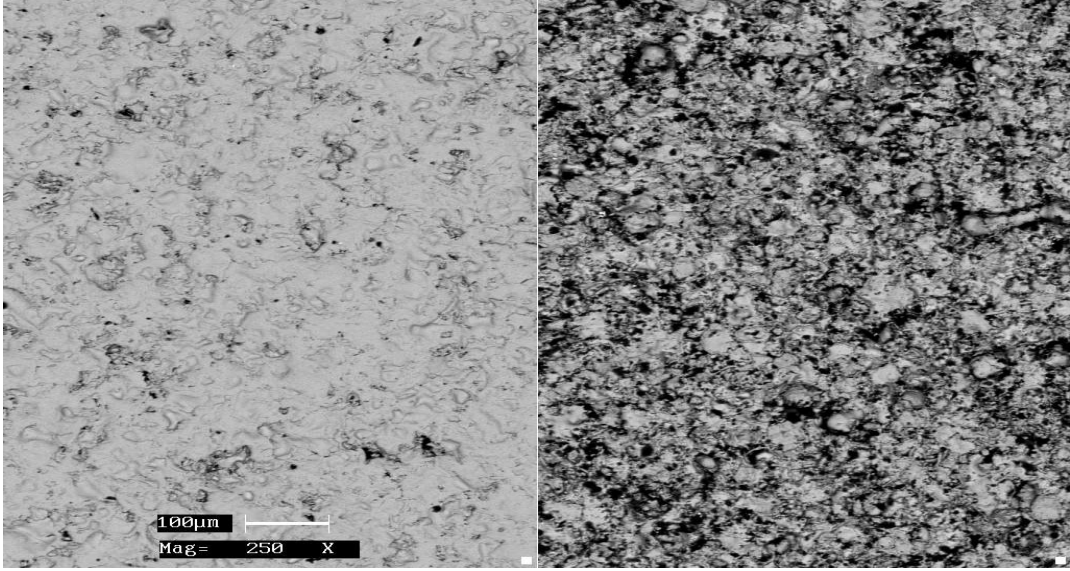
Şekil 4.22. incelendiğinde krom kaplamalı kuponların SEM resimlerinde özellikle sağ taraftaki aşınmış bölümde mikroçatlakları görmek mümkündür. Krom kaplama prosesi esnasında iç stresleri azaltmak için oluşan mikroçatlaklar, sonrasında krom ile kaplanır. Korozyon uygulamalarında; çatlakların az olması korozyonun bu bölgelerde yoğunlaşmasına yol açacağından mikroçatlaklı kaplama tercih edilir (Newby, 1994; Çakır, 1990).



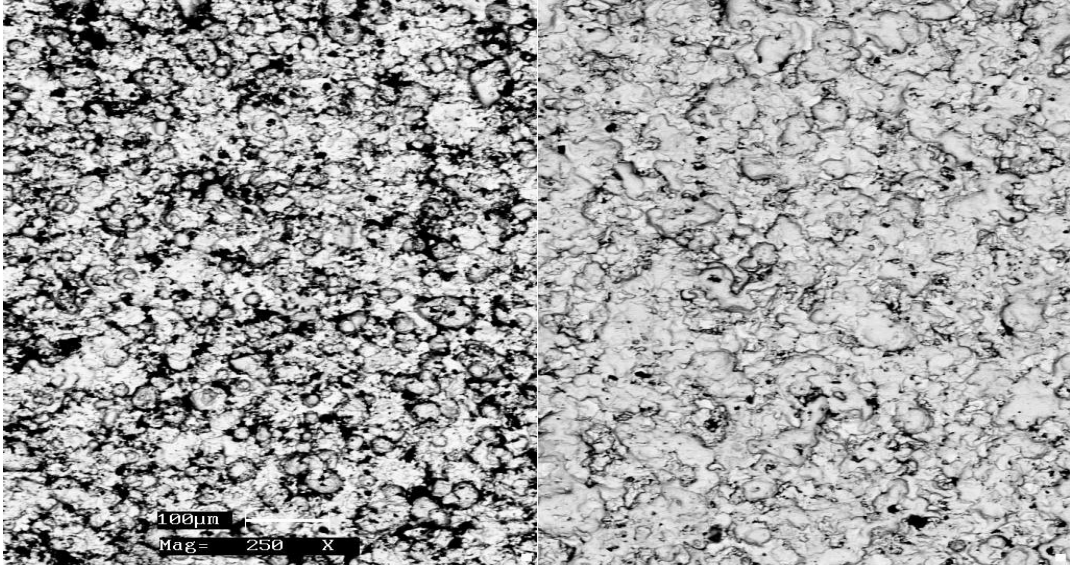
Şekil 4.22. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış krom kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü



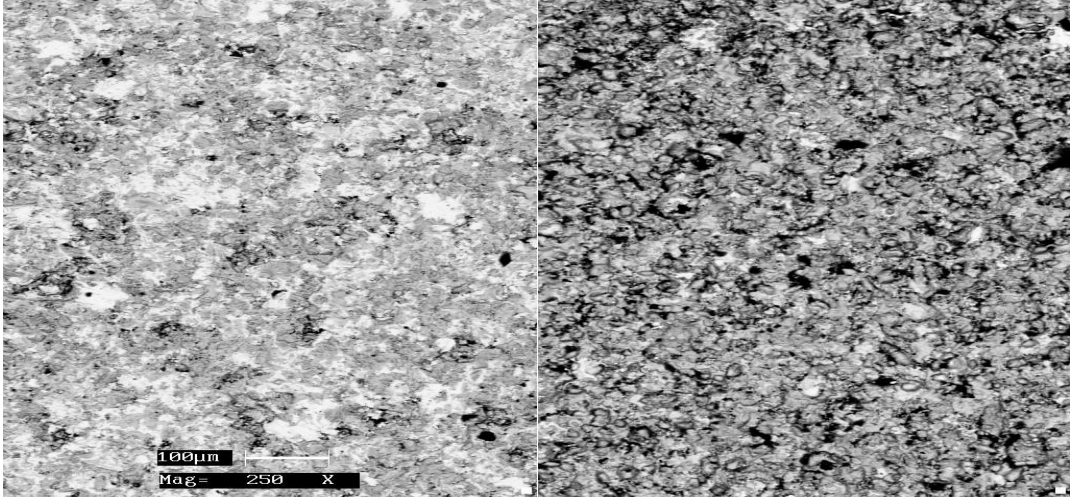
Şekil 4.23. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış alüminyum oksit kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü



Şekil 4.24. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış Tribaloy 400 kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü



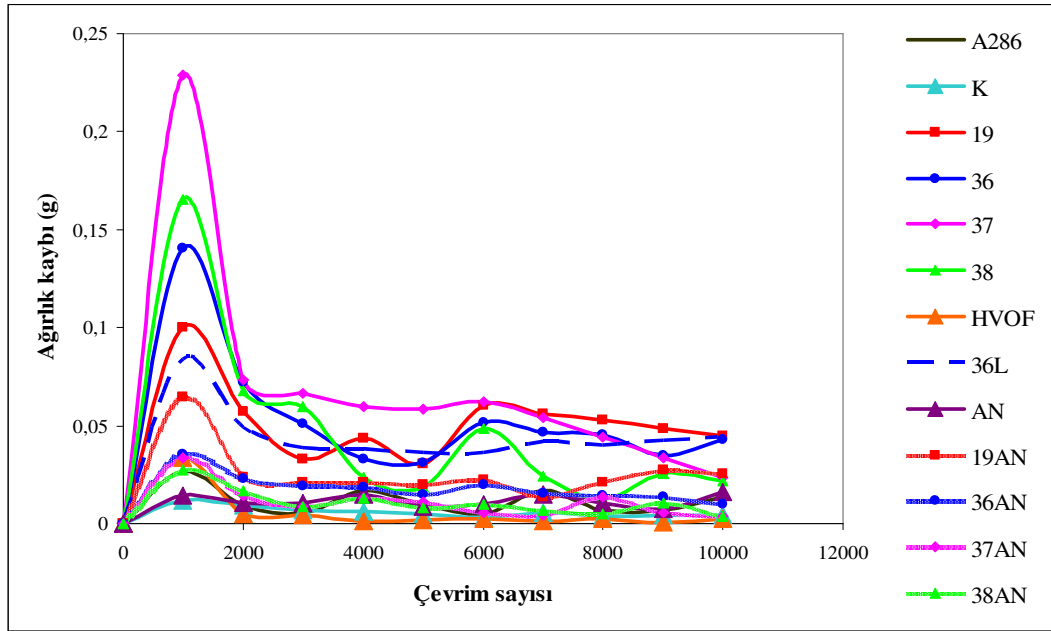
Şekil 4.25. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış tungsten karbür kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü



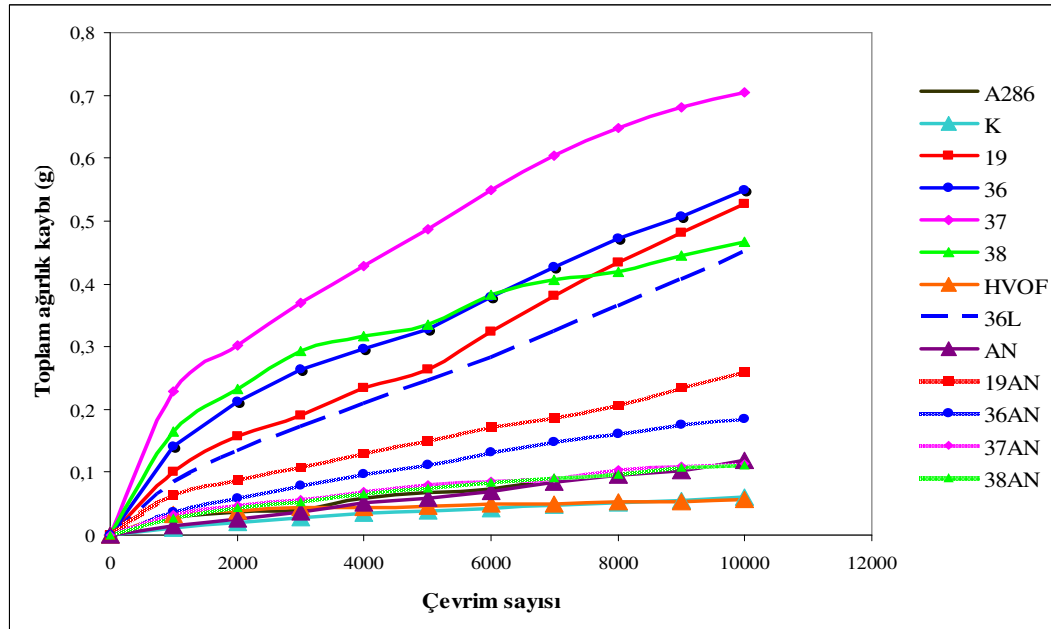
Şekil 4.26. Aşınma testi uygulanmamış ve uygulanmış krom karbür kaplamalı yüzeylerin SEM görüntüsü

4.23., 4.24., 4.25. ve 4.26.'da ki alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür kaplamalara ait SEM resimlerinde de termal sprej kaplamaların pürüzlü yüzeyleri görülmektedir. Şekil 4.27. incelendiğinde homojen olmayan yüzeylerinden dolayı, alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür plazma sprej kaplamaların aşınma hızının krom, akımsız nikel, HVOF yada modifikasyon uygulanmış plazma sprejli kaplamalara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. .

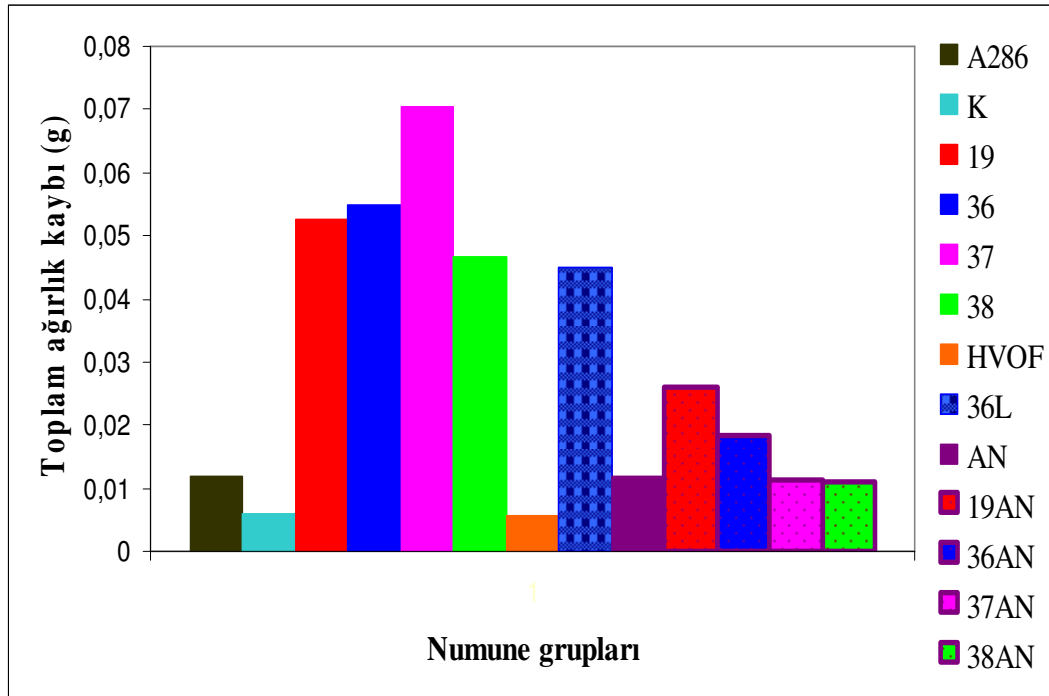
Her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerlerinin çevrim sayısına karşı grafiğe geçirildiği Şekil 4.27'de (deneysel veriler Ek 1'de verilmiştir) özellikle termal sprej kaplamalar için ilk çevrimlerde ki yüksek aşınma hızını takip eden bir sabitleme eğilimi görülmektedir. Termal sprej kaplamaların pürüzlü yüzeylerinden kaynaklanan bu eğilim özellikle plazma sprej ile kaplanmış alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür kaplamalarda daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Daha yoğun bir kaplama olan ve gerek kaplama içinde ki gözenek, oksit, kalıntıların gerekse yüzey pürüzlülüğününün daha az olduğu HVOF kaplamada aşınma hızının yanı sıra ilk çevrimlerde ki aşınma hızı yükselmesi de plazma sprej kaplamalara kıyasla daha azdır.



Şekil 4.27. Tüm gruplar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g



Şekil 4.28. Tüm gruplar için g olarak, toplam ağırlık kaybı değerleri (Deneysel veriler Ek 2’de verilmiştir)



Şekil 4.29. Tüm gruplar için g olarak, ortalama ağırlık kaybı değerleri

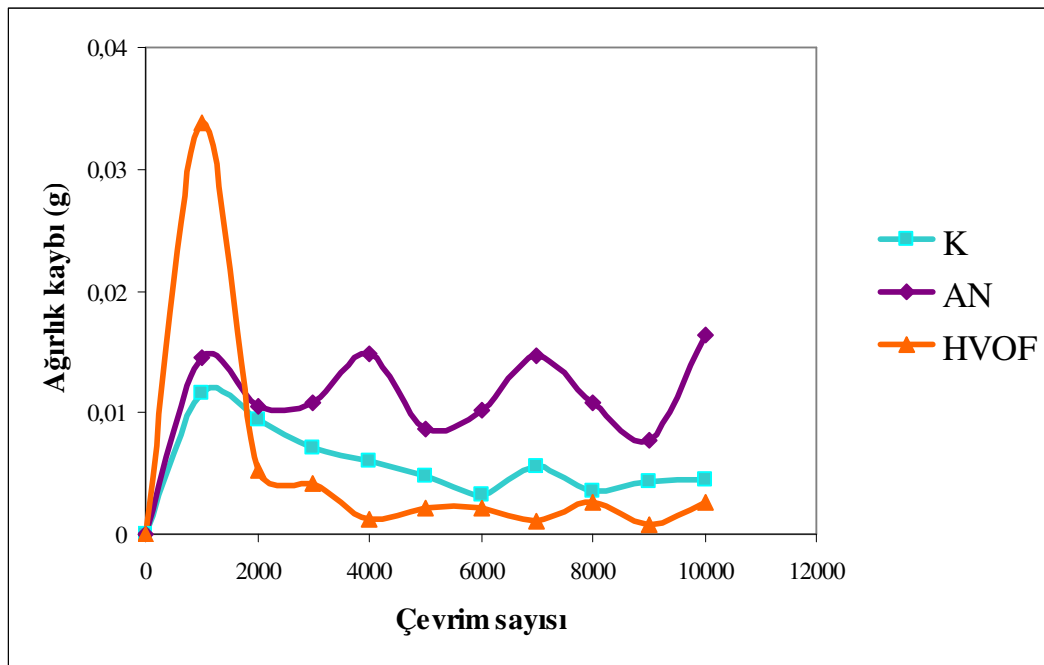
Şekil 4.27., 4.28 ve 4.29. incelendiğinde HVOF termal sprey kaplamanın kromla başa baş aşınma dayanımı gösterdiği görülmektedir. Tungsten karbür kaplamalı HVOF numunelerinin aşınma performansında tungsten karbür kaplamaların yüksek sertliği ve oksit içeriği de etkilidir. Başlangıçtaki aşınma miktarının krom kaplamaya kıyasla yüksek olmasının nedeni de yüzey pürüzlülüğüdür (Voorwald et al, 2005).

HVOF sistemlerinde ulaşılan yüksek parçacık hızları daha yoğun bir kaplama elde edilmesini sağlarken daha kısa uçuş zamanı ve toz parçacıklara daha düşük enerji transferi önemli oranda oksidasyonu azaltır. Bu da sprey kaplamanın üniform, karbitçe zengin, yoğun ve çok iyi aşınma özelliklerine sahip olmasını sağlar (Toma et al, 2001).

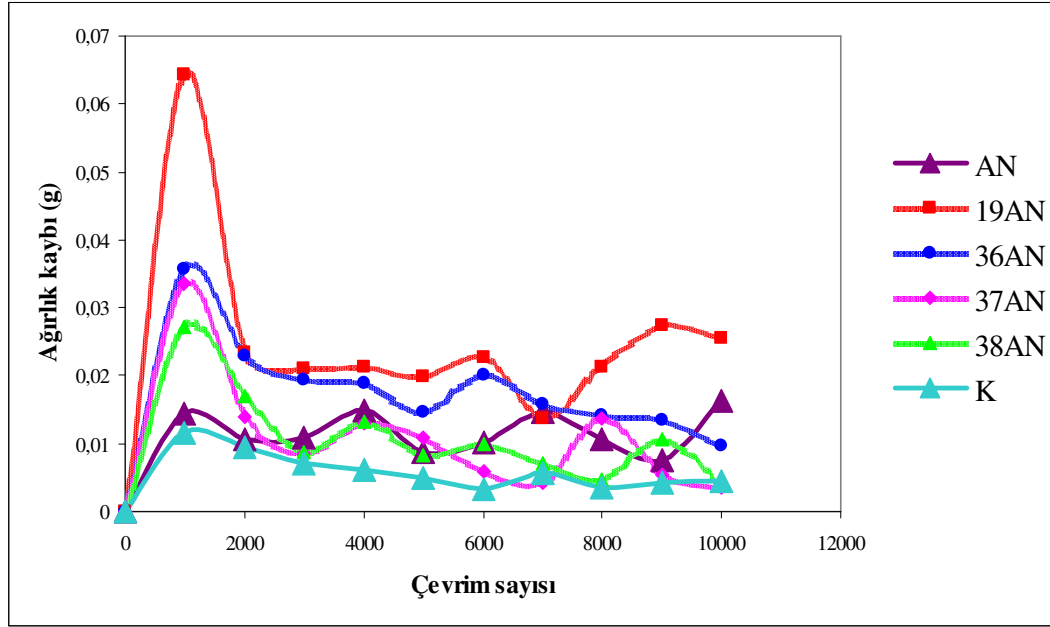
Sermet kaplamalarda genellikle WC ya da  $Cr_3C_2$  parçacıkları saf metal veya Ni, Cr, Co'ın karışımı olan metal bağlayıcı içerisinde bulunurlar. Termal sprey işlemi boyunca tungsten monokarbür (WC) yada krom karbürün termal bozunması ve metalik

bağlayıcı ile karbid reaksiyonları meydana gelir. Plazma alevinin yüksek sıcaklıkları ve oksitleyici spreyci atmosferi WC'ün bozunmasını takip eden  $W_2C$  gibi istenmeyen karbürlerin ve amorf, kırılğan Co-W-C bileşikleri ve metalik tungsten oluşumuna neden olur (Toma et al, 2001). Plazma spreyci işlemi ile kaplama esnasında karbon kaybı mekanik özelliklerde ve aşınma direncinde düşüğe sebep olur. Yapı içinde oluşan ikincil fazlar sertlik, tokluk ve aşınma direnci özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Sanchez et al, 2009).

Sert krom kaplamanın aşınma performansının akımsız nikel gibi pek çok metalik kaplama alternatifinden daha iyi olduğu bilinmektedir (Bozyazı et al, 2003). Ancak ısı işlemi ile sertliği artırılan akımsız nikel kaplamanın aşınma dayanımı iyileşmiş ve Şekil 4.27., 4.28 ve 4.29'da da görüldüğü gibi çalışılan numuneler arasında sert krom ve HVOF kaplamadan sonra yer almıştır.



Şekil 4.30. Krom, akımsız nikel ve HVOF kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g

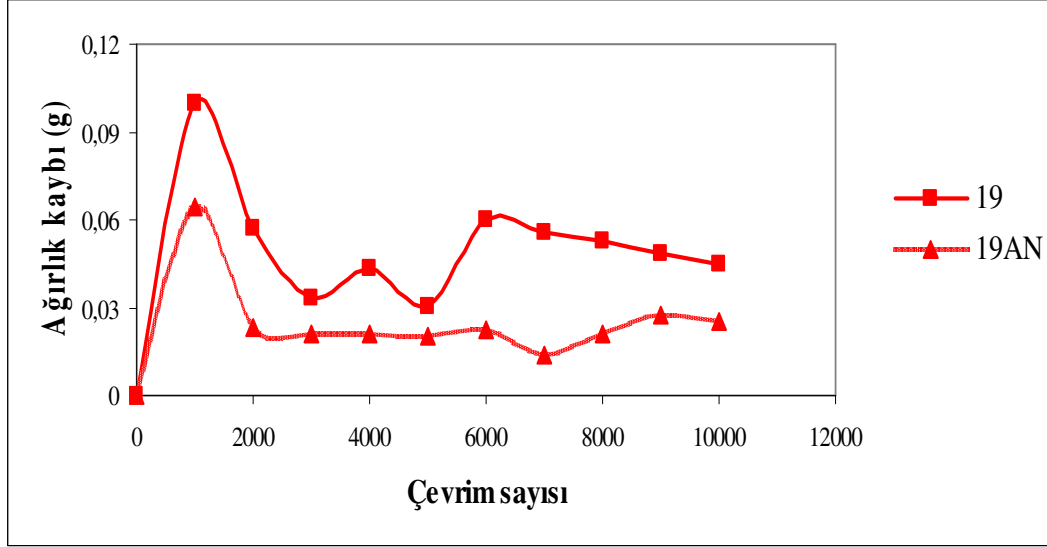


Şekil 4.31. Krom, akımsız nikel ve üzerine akımsız nikel uygulanmış termal spray kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g

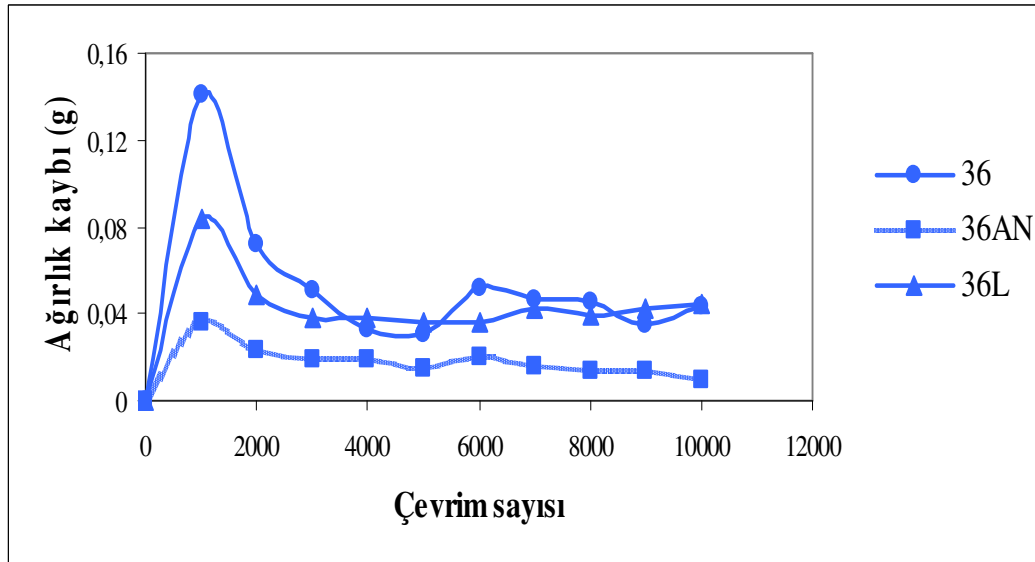
Şekil 4.31., 4.32., 4.33., 4.34 ve 4.35'te görüldüğü gibi termal spray kaplamalar üzerine uygulanan akımsız nikel kaplama işlemi mikroyapılarda da görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüklerini doldurarak aşınma dayanımını önemli oranda arttırmıştır. Akımsız nikelle kaplanmış tungsten karbür ve krom karbür ile akımsız nikel numuneler için toplam ağırlık kaybı değerleri aynıdır. Bunun nedeni bu kaplamaların diğer ikisine kıyasla daha kalın ve daha iyi tutunmuş olmasıdır.

Tribaloy 400 numunesine uygulanan lazer sırlama işlemi de nispeten aşınma dayanımını iyileştirdiği Şekil 4.33'te görülmektedir. Ancak, bu kaplamaya uygulanan modifikasyonlardan akımsız nikel uygulamasının daha başarılı olduğu görülmektedir.

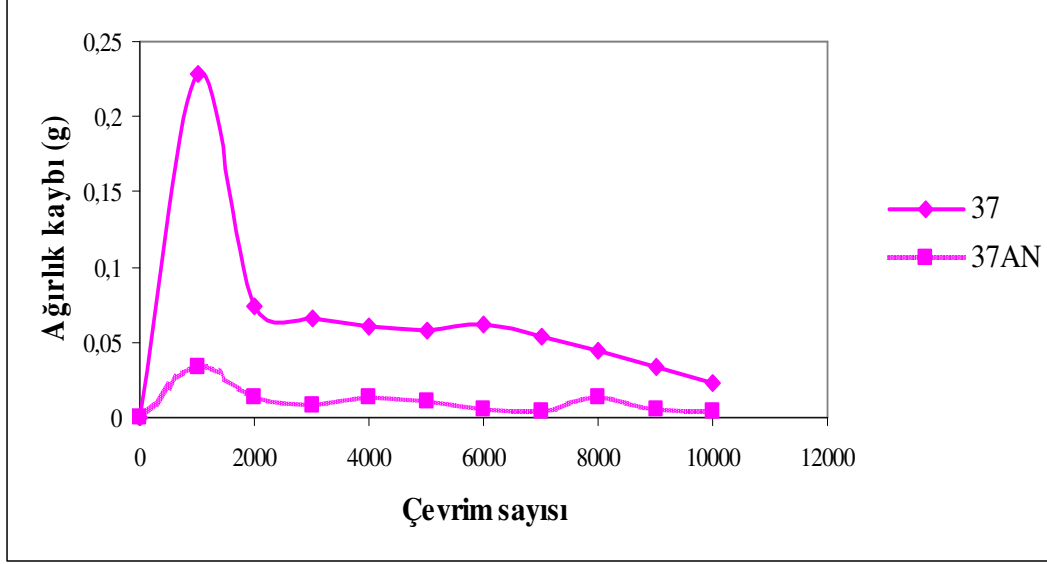




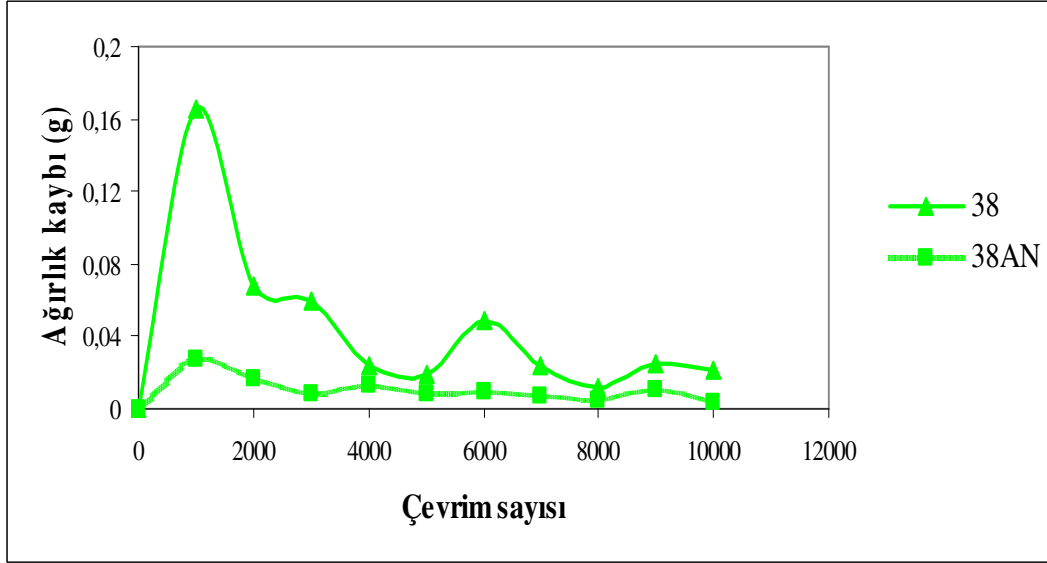
Şekil 4.32. Akımsız nikel uygulanmış (19AN) ve uygulanmamış (19) alüminyum oksit kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g



Şekil 4.33. Akımsız nikel (36AN), lazer sırlama (36L) uygulanmış ve modifikasyon yapılmamış T400 için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g



Şekil 4.34. Akımsız nikel uygulanmış (37AN) ve uygulanmamış (37) tungsten karbür kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g



Şekil 4.35. Akımsız nikel uygulanmış (38AN) ve uygulanmamış (38) krom karbür kaplamalar için her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g

Krom, akımsız nikel, HVOF tungsten karbür, akımsız nikel uygulanmış tungsten karbür ve krom karbür numuneleri ile ana malzemeye eşit ya da daha iyi aşınma dayanımı elde edilmiştir. Eğer bir aşınma uygulaması için kullanılacaksa bu kaplamaları kullanmanın daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.

#### **4.3.8. Korozyon testleri**

Korozyon testleri kapsamında elektrolitik korozyon, daldırma ve tuz testi gerçekleştirilmiştir.

##### **4.3.8.1. Elektrolitik korozyon testi**

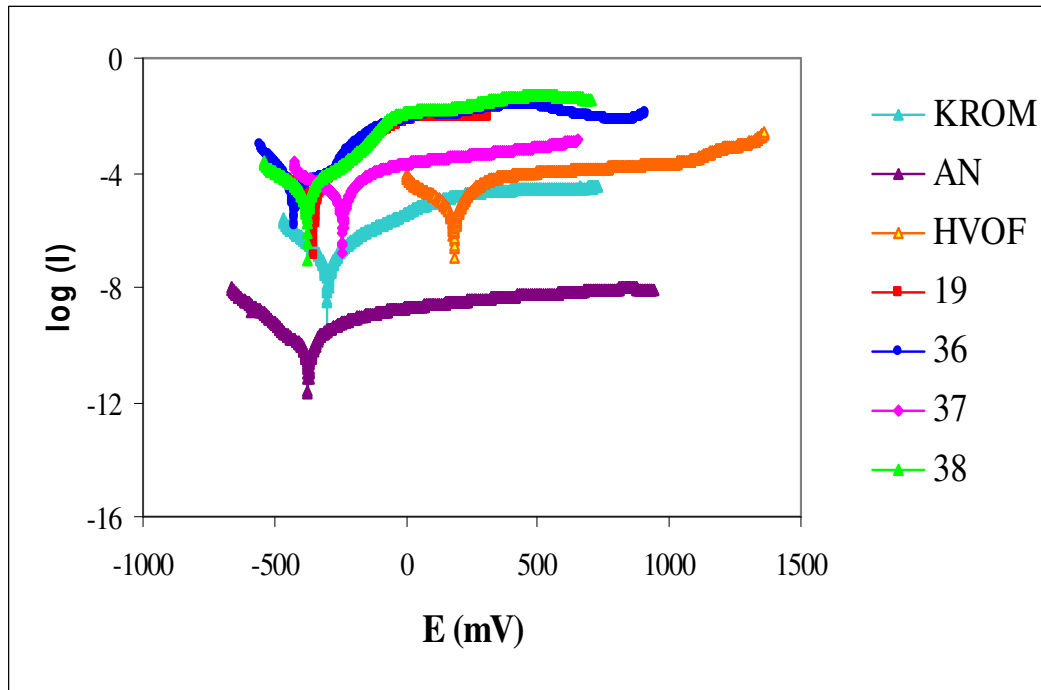
0,1 N HCl çözeltisi hazırlanarak galvanostat / potansiyostat cihazında korozyon akım değerleri ve akım, potansiyel eğrileri elde edilmiştir:

Termal spreyle kaplamalı kuponların 0,1 N HCl solüsyonundaki korozyon akım yoğunluğunun akımsız nikel ve krom kaplamalı kuponlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Gerek korozyon akım değerlerinin verildiği Çizelge 4.5. gerekse akım potansiyel eğrilerinden görüldüğü gibi (Şekil 4.36.) akımsız nikel kaplamanın korozyon akım yoğunluğu tüm diğer numunelerden daha düşüktür.

Genel kural olarak korozyon dayanımı, parçanın yüzey pürüzlülüğü ile bağlantılıdır; yani yüzey ne kadar pürüzlüyse daha fazla yüzey alanından dolayı daha çok korozyon atağı oluşur (Budke et al, 1999). Termal spreyle kaplamaların yüksek korozyon akım yoğunluğunda girintili çıkıntılı yüzeylerinin ve gözenekli yapısının etkili olduğu düşünülmektedir, poroziteler nedeniyle plazma spreyle oluşturulan kaplamaların korozyon için yetersiz kalabildiği değerlendirilmektedir (Evcin, 2006).

Çizelge 4.5. 0,1 N HCl çözeltisindeki korozyon akım değerleri

Test kuponu	Korozyon akım yoğunluğu (Amp/cm <sup>2</sup> )	Korozyon potansiyeli (mV)
A 286 (Ana metal)	2.81 x 10 <sup>-6</sup>	-175
Krom kaplama	1,26 x 10 <sup>-7</sup>	-299
Alüminyum oksit kaplama	1.31 x 10 <sup>-5</sup>	-407
Tribaloy 400 kaplama	2.16 x 10 <sup>-5</sup>	-363
Tungsten karbür kaplama	3.5 x 10 <sup>-5</sup>	-241
Krom karbür kaplama	3.2 x 10 <sup>-5</sup>	-248
Tungsten karbür HVOF kaplama	1,17 x 10 <sup>-5</sup>	-175
Akımsız nikel kaplama	1,61 x 10 <sup>-10</sup>	-396
Alüminyum oksit üzeri akımsız nikel kaplama	1,60 x 10 <sup>-4</sup>	-618
Tribaloy 400 üzeri akımsız nikel kaplama	1,92 x 10 <sup>-5</sup>	-307
Tungsten karbür üzeri akımsız nikel kaplama	2,49 x 10 <sup>-5</sup>	-377
Krom karbür üzeri akımsız nikel kaplama	2,57 x 10 <sup>-5</sup>	-350
Lazer sırlama uygulanmış Tribaloy 400 kaplama	2,23 x 10 <sup>-5</sup>	-417

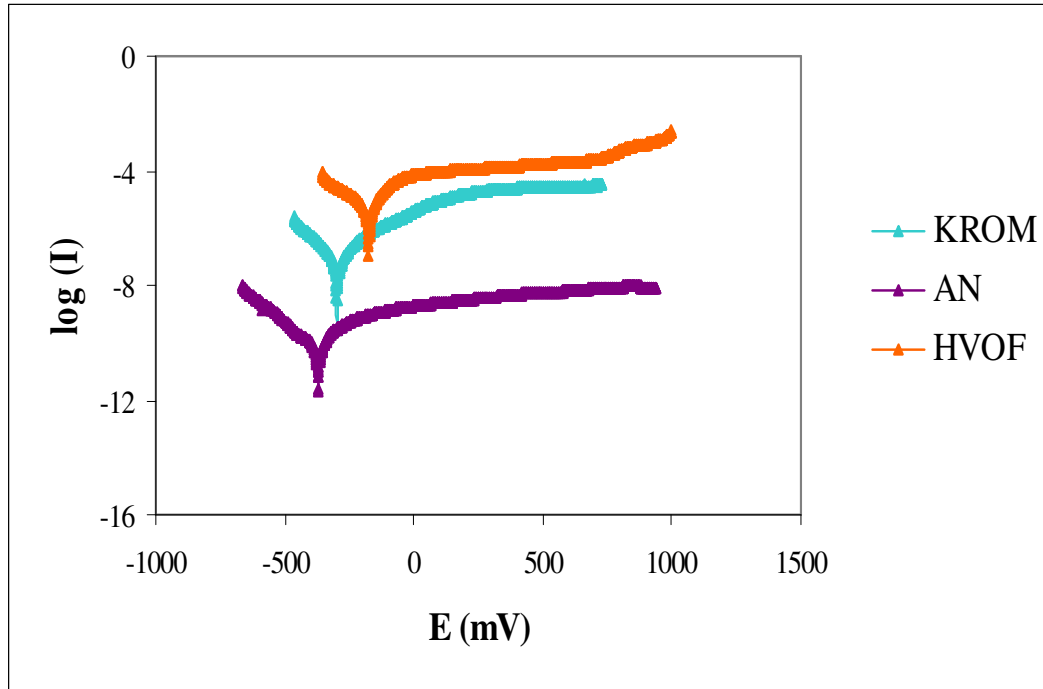


Şekil 4.36. Krom, akımsız nikel ve termal sprej kaplamalar (19, 36, 37, 38, HVOF) için akım potansiyel eğrisi

WC-Co-Cr kaplamalar oldukça geniş bir partikül boyutu dağılımına ve homojen olmayan sert faz-metal bağlayıcı oranına sahip toz malzemeler ile uygulanmaktadır, metal matris hafif çıkıntılı yapıdaki karbür taneleri ile kaynaşmış durumdadır. Ayrıca yapıdaki Co ve Cr herhangi bir katı çözelti oluşturmazlar ve saf metaller olarak yer alır. Metal matriste yer alan heterojenlikler, korozyon aktivasyonunun başlaması için uygun bölgeler meydana getirebilir (Bolelli et al, 2006 b).

HVOF sprej kaplamalar pasive olmayan malzemelerden (özellikle Co metal matriks) oluşur; bu yüzden klor iyonlarının koruyucu oksit filmine saldırmasıyla oluşan çukurcuk korozyon mekanizmasına rastlanmaz. Sermet kaplamaların polarizasyon eğrileri asla pasivasyon aralığı göstermez; bunun yerine anodik eğride aktivasyon segmenti önemli bir akım değişimi olmaksızın maksimum akım değerine ulaşır. Bu tip

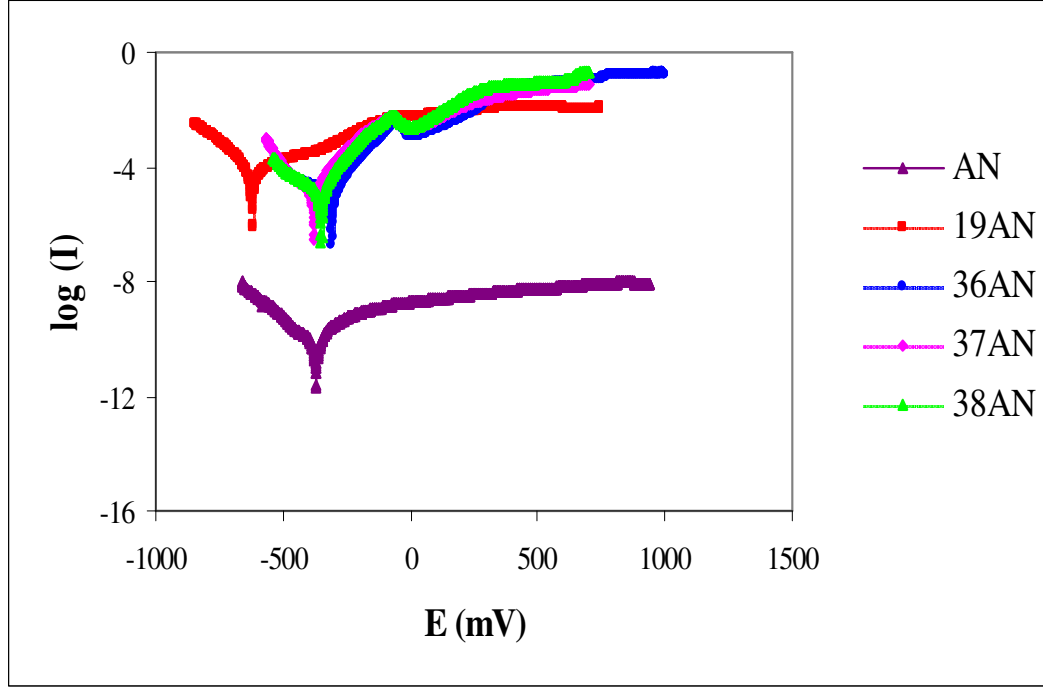
diyagramlar elektrokimyasal mekanizmanın daha uzun süre korozyon hızı kontrol faktörü olmadığı proseslerin karakteristiğidir. Bu olay şu varsayımla açıklanabilir: prosesin aktivasyon basamağında hasarlanmamış karbid parçacıkları yüzeyin dışına çıkarken matris oldukça üniform bir şekilde korozyona uğrar ve belki korozyon ürünleri birikir; kaplama yüzeyi başlıca dışarı çıkan karbid parçacıklarından oluştuğunda ve metalik fazlar korozyon ürünleriyle kaplandığında, korozyon prosesi difüzyon tarafından kontrol edilir (Bolelli et al, 2006 b).



Şekil 4.37. Krom, akımsız nikel ve HVOF termal sprey kaplamalar için akım potansiyel eğrisi

Cl<sup>-</sup> iyonları, pasifleşerek kaplamayı koruyan yüzey filmini kimyasal olarak bozundurarak veya bölgesel olarak hasar vererek, oyuklanma korozyonuna neden olabilmektedir. Elektrolitik sert krom kaplamanın korozyon performansında krom kaplamaya son proses olarak uygulanan hidrojen giderme ısıl işlemi etkili olmuştur.

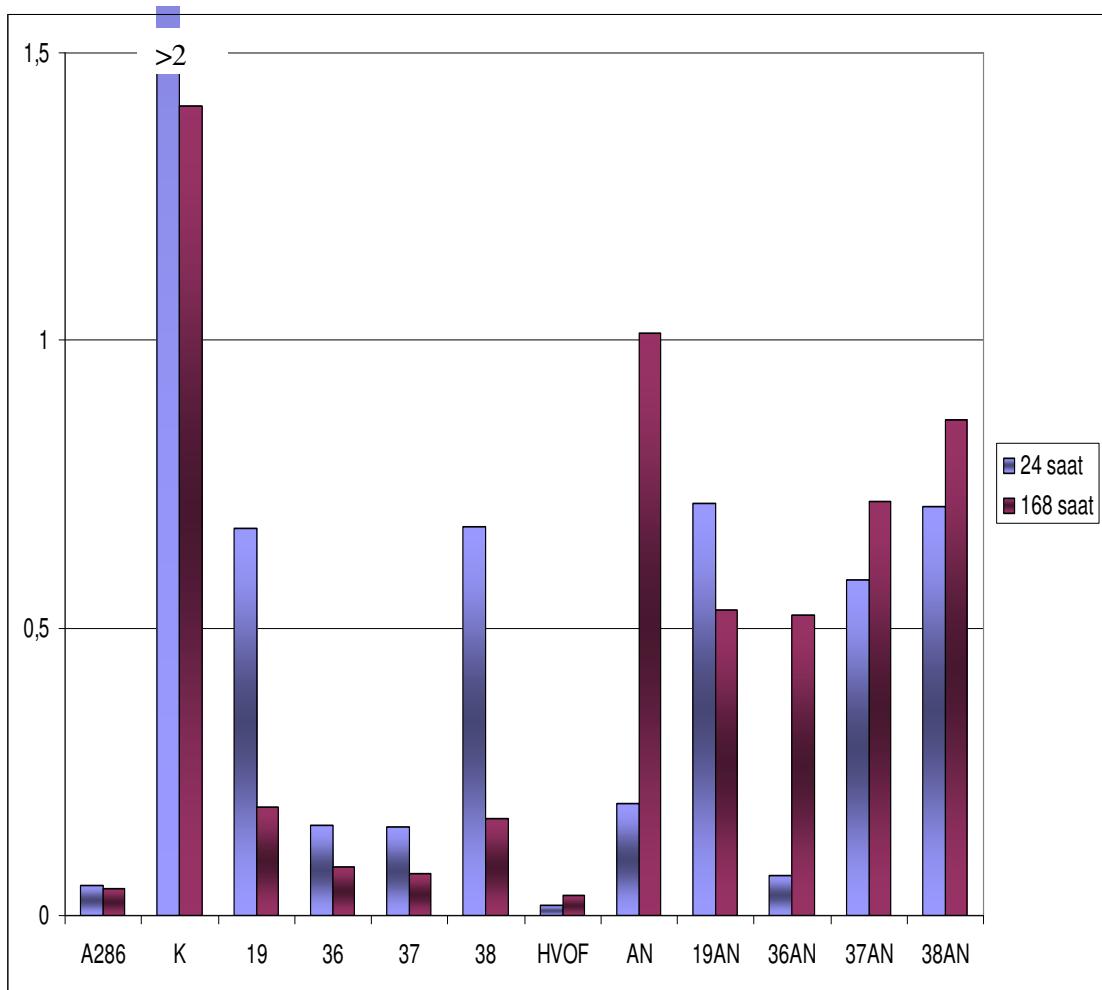
Krom kaplama için hidrojen giderme işlemiyle,  $E_{\text{corr}}$  daha yüksek değerlere çıkarken,  $i_{\text{corr}}$  azalmıştır ( $10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> mertebesinde). Hidrojen çıkışının neden olduğu krom kaplamanın kimyasal değişimi pasif oksit filminin stabilitesini arttırarak çukurcuk korozyon mekanizmasını perdelemiştir (Bolelli et all, 2006 b).



Şekil 4.38. Akımsız nikel ve akımsız nikel kaplanmış termal sprey numuneleri (19, 36, 37, 38) için akım potansiyel eğrisi

#### **4.3.8.2. Daldırma testi**

1 N HCl çözeltisi hazırlanarak ASTM F 483'e göre daldırma testi gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için g/dm<sup>2</sup>.gün cinsinden korozyon hızı değerleri Çizelge 4.8. ve Şekil 4.34.'te verilmiştir.



Şekil 4.39. Tüm numuneler için 24 ve 168 saat sonrasında korozyon hızları

HCl çözeltileri özellikle pasifize olan (örneğin krom) metaller üzerinde agresif özellik göstermektedir. Çünkü  $Cl^-$  iyonları saldırarak oksit tabakasına zarar vermekte ve bu şekilde lokal korozyon (örneğin pitting-oyuklanma korozyonu) meydana gelmektedir. 24 saat serbest korozyon sonrasında krom kaplamanın korozyon davranışlarında elektrokimyasal testlerde bahsedilen hidrojen giderme işleminin etkisi kalmamış ve bu nedenle korozyon hızlanmıştır (Bolelli et al, 2006 b).



Çizelge 4.6. 1 N HCl çözeltisindeki ağırlık kaybı ve korozyon hızı değerleri

Test kuponu	24 saat sonrasında korozyon hızı (g/dm <sup>2</sup> xgün)	168 saat sonrasında korozyon hızı (g/dm <sup>2</sup> xgün)
A 286 (Ana metal)	0,0532	0,04705
Krom kaplama	8,5348	1,4068
Alüminyum oksit kaplama	0,6733	0,1895
Tribaloy 400	0,156	0,0827
Tungsten karbür kaplama	0,1543	0,07198
Krom karbür kaplama	0,6752	0,1694
Tungsten karbür HVOF kaplama	0,0183	0,0342
Akımsız nikel kaplama	0,1932	1,0117
Alüminyum oksit üzeri akımsız nikel kaplama	0,7177	0,5300
Tribaloy 400 üzeri akımsız nikel kaplama	0,069	0,522
Tungsten karbür üzeri akımsız nikel kaplama	0,5818	0,7204
Krom karbür üzeri akımsız nikel kaplama	0,7112	0,8613

Tungsten karbür esaslı HVOF kaplama, hidroklorik asitteki korozyon testinde başarılı bir performans göstermiştir. Bunun sebebi WC esaslı kaplamada bir pasivizasyon ve dolayısıyla koruyucu film tabakası bulunmaması ve klor iyonlarının saldırıca bir oksit bulamamasıdır (Leahey, 2009).

#### **4.3.8.3. Tuz testi**

100 saat tuz testi uygulanan numunelerden alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbürde korozyon belirtileri görülmüştür. Bu kaplamaların bulunduğu numuneler ve kıyaslama açısından krom kaplamalı numunelerin tuz testi öncesi ve sonrasındaki görüntüleri 4.40.'dan 4.48.'e kadar olan resimlerde verilmiştir.

Tuz spre testi ile ilgili yapılan çalışmalarda kaplama kalınlığı ve kaplamanın uygulandığı ana malzeme iki önemli parametredir.

Örneğın Sartwell ve Legg'in çalışmasında 1000 saat tuz testi sonrasında 4340 ana malzeme üzerinde ki;

- 0,003 inç kalınlığında kaplama uygulandığında elektrolitik sert kromun plazma spre ve HVOF spre kaplamalardan daha iyi performans gösterdiğı,
- 0,015 inç kalınlığında kaplama içinse ise HVOF T 400 ve plazma spre T 400 kaplamaların krom kaplamaya eşdeğer, HVOF Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr ve HVOF T-800'ün krom kaplamadan daha az koruma sağladığı belirtilmiştir (Sartwell and Legg, 2004).

Inconel 718 ana malzeme içinse 0,003 inç ve 0,015 inç kalınlığında plazma spre ve HVOF kaplamalara uygulanan 1000 saat tuz testi sonunda 4340 ana malzemede görülen çatlaklar ve kalkmalar görülmemiş çok küçük korozyon lekeleri belirlenmiştir. Buradan ana malzemenin etkisi bariz bir şekilde görülmektedir (Sartwell and Legg, 2004).

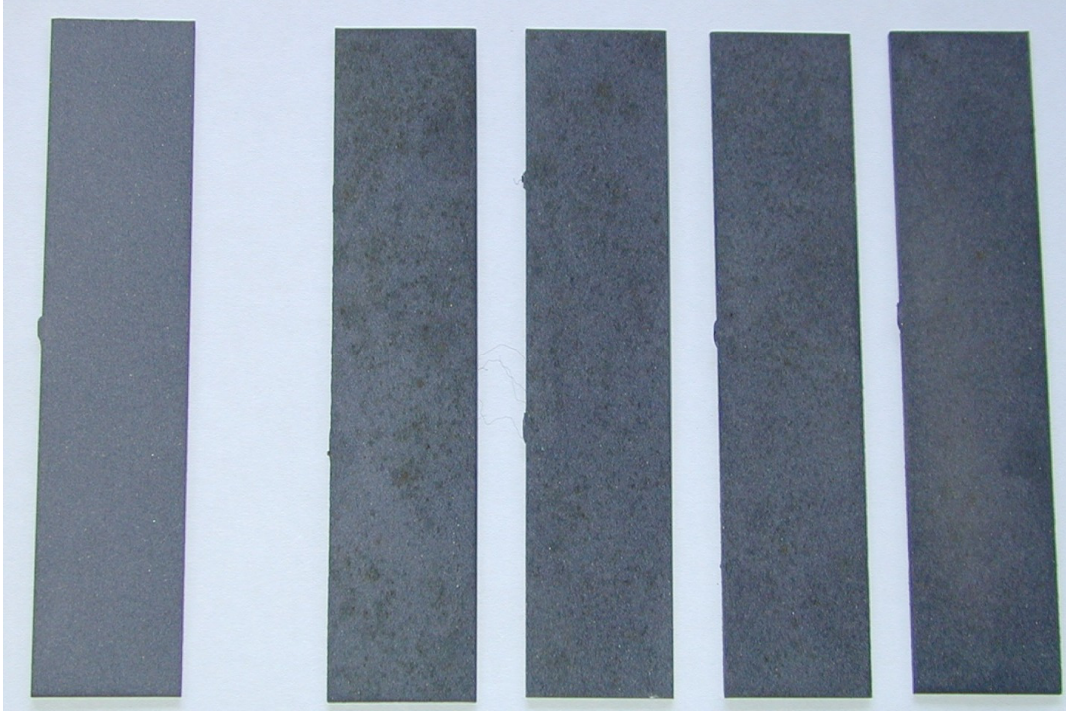
0,003 inç kaplama kalınlığında 4340 ana malzeme üzerine uygulanan plazma sprej ve HVOF kaplamalar ASTM B 117 tuz sprej testinde sert krom kaplamadan daha başarısız olmasına rağmen atmosferik korozyon testleri ve servis testlerinde WC/Co HVOF kaplamalar sert krom kaplamadan daha başarılı olmuştur (Sartwell and Legg, 2004).

Tuz testi farklı malzemelerin ve kaplamaların karşılaştırılması amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak sıklıkla karşılaşılan, hassas koşullarla değişen koruyucu filmlerin oluşumu ve onların koruyucu değerlerini içeren reaksiyon mekanizmaları, tuz sprej dayanımı ile farklı bir malzeme içerisindeki dayanım arasında direkt bir ilişki kurulmasını engeller. Aynı anda kaplanan parçalarda bile kaplama kalınlığı ve kalitesi arasında belirgin farklılıklar gözlemlenebilir (ASTM B 117, 2008).

4.40'tan 4.48.'e kadar olan resimlerde görüldüğü gibi 100 saatlik tuz sprej testi sonucunda en yoğun korozyon APS tungsten karbür kaplamalı numunelerde görülmüştür.

Toma ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da aynı kalınlık ve aynı porozite oranında ki kaplamalar arasında WC-Co kaplamaların daha az koruyucu olduğu tespit edilmiştir. Kobalt bağlayıcı aktif bir şekilde korozyona uğramaktadır. Krom karbür sermet kaplamalar WC-Co kaplamalardan daha iyi korozyon dayanımı göstermiştir (Toma et al, 2001).

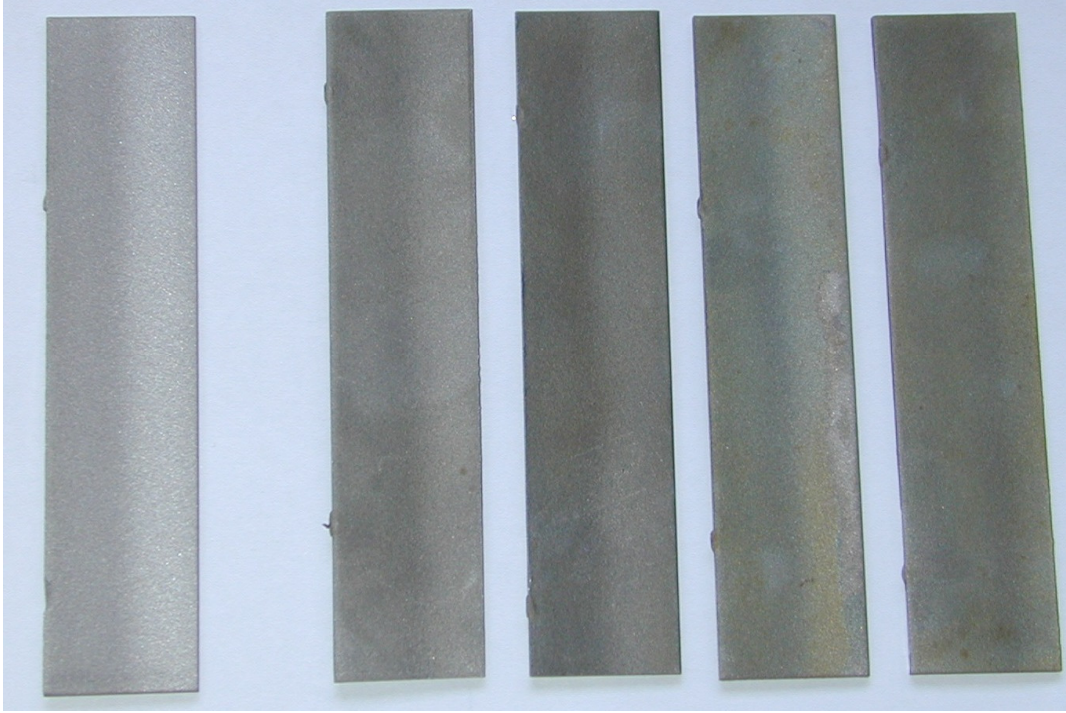
Tribaloy 400 (Co-28Mo-8Cr-2Si) ve krom karbür (%75 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, %20 Ni, %5 krom tozu) kaplamaların tungsten karbür kaplamaya kıyasla 100 saatlik tuz sprej testinde daha iyi performans göstermesinde yapılarında bulunan kromun pasif oksit filmi oluşturmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Alüminyum oksit kaplama hâlihazırda oksit tabakası içermektedir.



Şekil 4.40. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş alüminyum oksit kaplamalı kuponlar



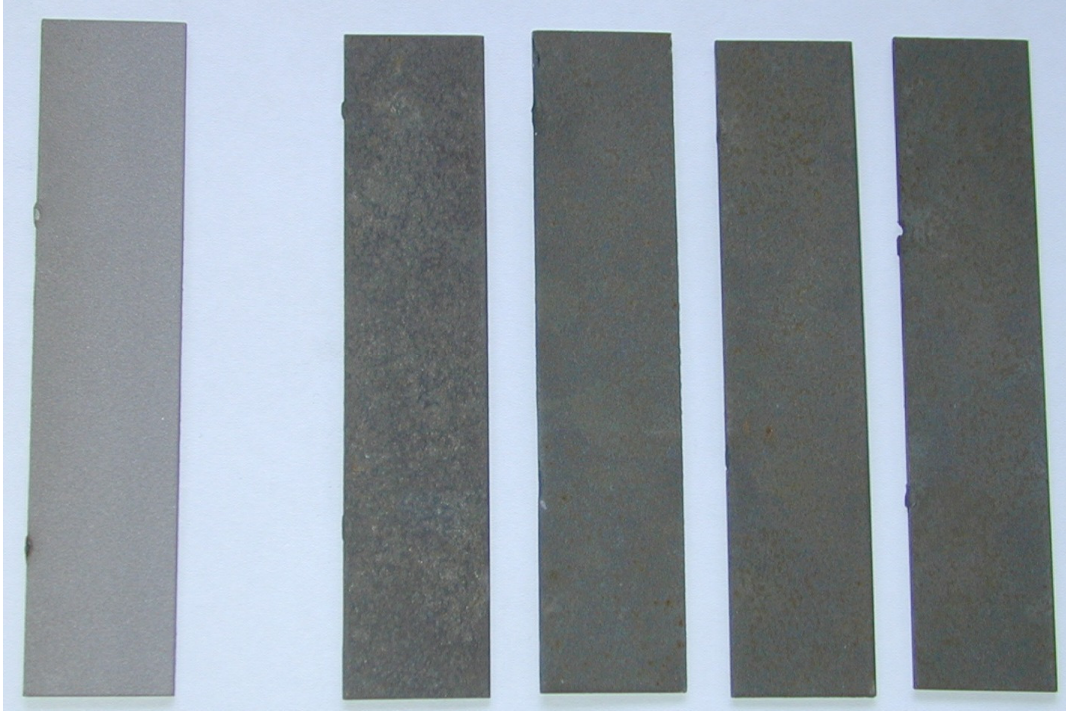
Şekil 4.41. 100 saat tuz testi sonrasında alüminyum oksit kaplamalı kupon



Şekil 4.42. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş Tribaloy 400 kaplamalı kuponlar



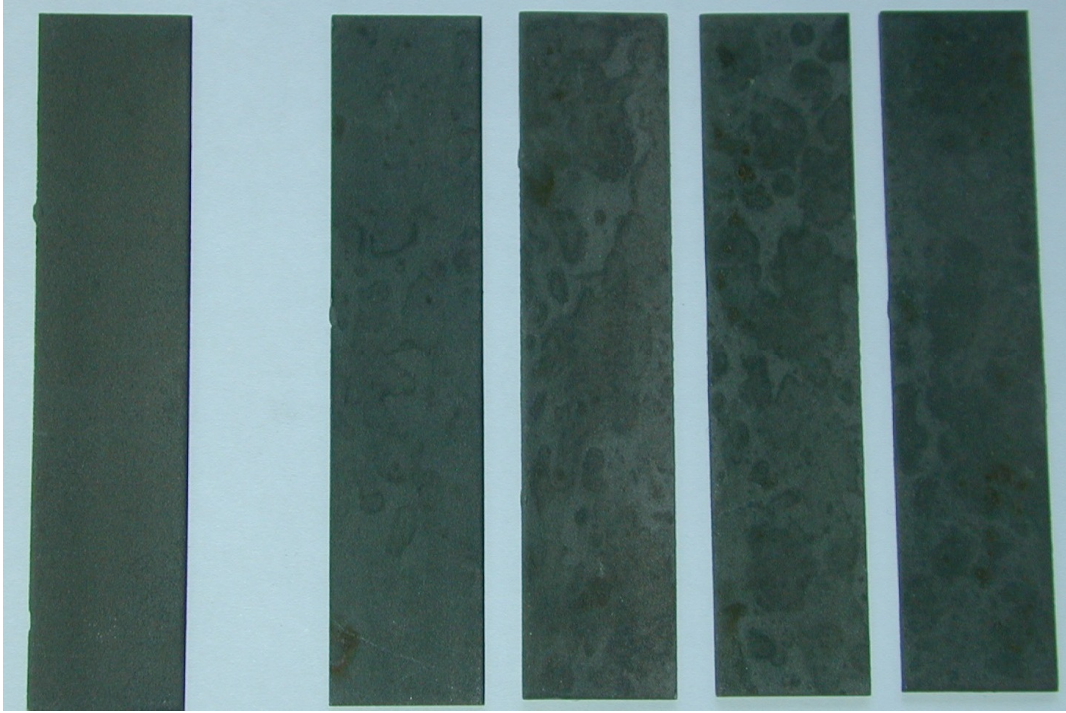
Şekil 4.43. 100 saat tuz testi sonrasında Tribaloy 400 kaplamalı kupon



Şekil 4.44. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş tungsten karbür kaplamalı kuponlar



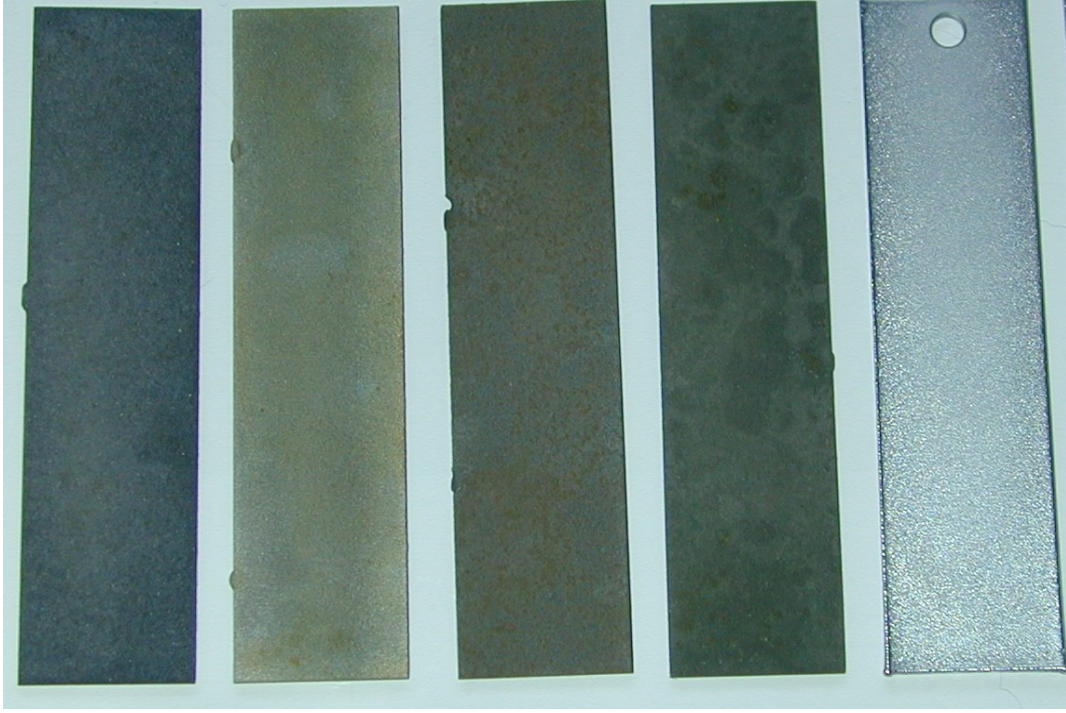
Şekil 4.45. 100 saat tuz testi sonrasında tungsten karbür kaplamalı kupon



Şekil 4.46. İşlem görmemiş ve tuz testine girmiş krom karbür kaplamalı kuponlar



Şekil 4.47. 100 saat tuz testi sonrasında krom karbür kaplamalı kupon



Şekil 4.48. 100 saat tuz testi sonrasında alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür, krom karbür ve krom kaplamalı kuponlar



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada krom kaplama ve alternatifi olarak değerlendirilen akımsız nikel ve termal sprej kaplamaların yapısal, mekanik ve korozif özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Termal sprej kaplamalar plazma sprej ve yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF) prosesleri ile elde edilmiştir. HVOF ve krom kaplamalara göre daha girintili çıkıntılı yüzeylere sahip olan plazma sprej kaplamalara akımsız nikel uygulaması ve lazer sırlama yöntemleri uygulanarak aşınma ve korozyon özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen verilere dayalı çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Plazma sprej kaplamaların girintili çıkıntılı yüzeylerinin sonucu olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri krom, akımsız nikel ve daha yoğun bir termal sprej kaplama olan HVOF'ye kıyasla daha yüksektir. Alüminyum oksit (19AN) hariç plazma sprej kaplamalar üzerine uygulanan akımsız nikel ile pürüzlülük değerleri düşmüştür.
- Plazma sprej kaplama üzerine akımsız nikel uygulanan test kuponlarının kalınlığına bakıldığında en yüksek akımsız nikel katmanı kalınlığına tungsten karbür ardından sırayla krom karbür, Tribaloy 400 ve alüminyum oksit numunelerde ulaşıldığı gözlenmiştir.
- En yüksek sertlik değeri 1239,2 HV 0,1 ile HVOF tungsten karbür kaplamada elde edilmiştir, sonrasında sırasıyla tungsten karbür, akımsız nikelli numuneler, krom karbür, alüminyum oksit, krom ve Tribaloy 400 gelmektedir.
- Sert WC taneciklerinin dayanıklı kobalt bağlayıcı matriks içinde bulunduğu tungsten karbür kaplamada yüksek sertliği sağlayan WC tanecikleridir. Plazma sprej işlemi ile kaplama esnasında karbon kaybı mekanik özelliklerde ve aşınma direncinde düşüşe sebep olmuş yapı içinde oluşan ikincil fazlar sertlik özelliğini

olumsuz etkilemiştir. HVOF tungsten karbür kaplamada ise ulaşılan yüksek parçacık hızı daha yoğun bir kaplama elde edilmesini sağlarken daha kısa uçuş zamanı ve toz parçacıklara daha düşük enerji transferi önemli oranda oksidasyonu azaltmış ve bu da spreycaplamasının karbitçe zengin olmasını sağlamıştır.

- Krom kaplamasının sertliğinin literatürde verilenden (700-1000 HV) biraz daha düşük olmasının nedeninin kaplama sonrasında yapılan ısı işlem olduğu değerlendirilmiştir.
- Akımsız nikel ve plazma spreycaplamasına uygulanan akımsız nikel numunelerindeki akımsız nikelin sertliği de 400 °C’de 1 saat ısı işlem ile artırılmıştır.
- Mikroyapı resimleri incelendiğinde özellikle krom ve akımsız nikel kaplamaların daha dolu, ana metal ile arasında iyi bir bağ oluşacak şekilde ve düzgün, homojen, porozitesiz olduğu görülmüştür.
- Termal spreycaplamalarda ise gerek ana malzeme kaplama ara yüzeyinde gerekse kaplama yüzeyinde girintili çıkıntılı bir yapı görülmektedir. Ayrıca plazma spreycaplamasına uygulanan alüminyum oksit, Tribaloy 400, tungsten karbür ve krom karbürde daha yoğun olmak üzere içyapıda boşluklar, inklüzyonlar, ergimemiş parçacıklar ve oksitler bulunmaktadır. HVOF için ise kaplama prosesi esnasında toz taneleri, kazandığı aşırı yüksek hızla yüzeye çarptığından elde edilen kaplama daha yüksek yoğunlukta ve güçlü olmuştur. Ayrıca porozite oranı da çok daha düşüktür.
- Üzerine akımsız nikel uygulanan plazma spreycaplamalarında, akımsız nikel plazma spreycaplamasının pürüzlülüklerini takip etmiş ve bir oranda kaplama yüzeyi üzerindeki boşlukları doldurmuştur.

- Aşınma testi sonucunda krom ve HVOF kaplamanın başa baş bir aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.
- Termal sprej kaplamalar için aşınma dayanımı özellikle gözeneklilik, kaplanan partiküllerin içeriği ve tane boyutu dağılımına bağlıdır. Yüksek gözeneklilik (yaklaşık % 2-3), aşınma dayanımını düşürecektir.
- Tüm termal sprej kaplamaların g/1000 olarak ağırlık kaybı değerlerinin verildiği grafiklerde ilk çevrimlerde hızlı bir yükseliş sonrasında da düşerek sabitlenme görülmüştür. Bu ilk çevrimlerde mikro yapılarda da açıkça görülen kaplama yüzey pürüzlülüklerinin kolayca kaplamadan uzaklaşması nedeniyledir.
- Alüminyum oksit termal sprej kaplama üzerinde kısmi tutunma görülmüştür. Ancak bu kısmi tutunma bile aşınma dayanımında müspet bir iyileşmeye neden olmuştur. Ancak çevrim sayısı arttıkça kalın bir akımsız nikel tabakası olmadığı için akımsız nikel olmayan hali ile yakın aşınma değerleri göstermiştir.
- Termal sprej kaplamalar üzerine uygulanan akımsız nikel ve lazer sırlama modifikasyonları aşınma değerlerini düşürmüştür.
- Mikroyapı incelemesinde plazma sprej kaplamalar üzerine uygulanan akımsız nikellerin pürüzlülükleri takip ettiği görülmüştür.
- Özellikle tungsten karbür ve krom karbür numunelerde iyi bir akımsız nikel kaplama kalınlığı elde edildiği için akımsız nikel ile eşdeğer aşınma özellikleri elde edilmiştir. Bu şekilde önemli bir krom kaplama alternatifi olan ancak kalınlık ile ilgili sınırlamaları olan akımsız nikelin, daha kalın kaplama ihtiyacı duyulan yerlerde de kullanılabileceği değerlendirilmiştir.
- Lazer sırlama uygulanan Tribaloy 400 numunesinde gerek kalınlık ölçümü gerekse mikroyapı değerlendirmesi yapıldığında kaplamanın üst katmanlarında

tam bir sinterlenme sağlanamamış olduğu görülmektedir. Ancak uygulanan sırlama işlemi ile aşınma dayanımında bir iyileşme gözlenmiştir. Buradan hareketle oluşan katmanın çok ince olup optik mikroskopla değerlendirilemediği düşünülmüştür.

- Düşük konsantrasyonda ve kısa süreli uygulanan elektrokimyasal korozyon testlerinde en düşük korozyon akım yoğunluğuna akımsız nikelin sahip olduğu görülmektedir.
- Daha yüksek konsantrasyonda ve daha uzun süreli testlerde ise termal spreycaplamalar daha başarılı olmuştur.

Yukarıdaki maddelerde de görüldüğü üzere herhangi bir sert kaplama krom alternatifi olarak kullanım için yeterli değildir. Krom kaplama alternatifini seçerken pek çok nokta göz önünde bulundurulmalıdır:

- Ana metalin cinsi ve bu metale uygulanabilecek ısı işlem sıcaklıkları,
- Kaplama uygulanacak parçanın ölçüleri ve geometrisi,
- Parçanın işletme koşulları da (koroziv ortam, aşındırıcı ortam vb.) değerlendirilerek tüm mühendislik gereksinimleri (sertlik, sürtünme, elektrokimyasal potansiyel vb.),
- Özellikle havacılık uygulamalarında kaplamanın tekrarlanabilirliği.

Alternatif kaplama metodu seçilirken hammadde, üretim ekipmanı, son işlem, kaplama performansı bir bütün halinde düşünülerek seçim yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alcrome Technologies Pvt.Ltd., 2010, [www.electrolessnickelplating.net](http://www.electrolessnickelplating.net)
- Amperit, 2010, [www.amperit.com](http://www.amperit.com)
- Astm B 117, 2008, Standart Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, Astm International
- Azizi A., Mohammadi M., Sadrnezhaad S.K., 2010, Effect of heat treatment on properties of various electroless NiCoFe-B coatings, International Conference on Materials Heat Treatment, p8
- Azomaterials, 2010 a, [www.azom.com](http://www.azom.com)
- Azomaterials, 2010 b, Thermal spraying versus hard chrome plating, [www.azom.com](http://www.azom.com)
- Baudrand D. W., 1994, ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.
- Bal Seal Engineering, 2010, [www.balseal.com](http://www.balseal.com)
- Berk V., 2004, Yüzey işlemler teknolojileri I, [www.galvanoteknik.org](http://www.galvanoteknik.org)
- Bolelli G., Cannillo V., Lusvarghi L. and Ricco S., 2006a, Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings, Surface & Coatings Technology, 200, 2995-3009
- Bolelli G., Giovanardi R., Lusvarghi L and Manfredini T., 2006b, Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement, Corrosion Science, 48, 3375–3397
- Bozyazı E., Ürgen M. and Çakır A.F., 2004, Comparison of reciprocating wear behaviour of electrolytic hard chrome and arc-PVD CrN coatings, Wear, 256, 832–839
- Budke E., Krempel-Hesse J, Maidhof H. and Schüssler H., Surf. Coat. Technol, 112 (1999) 108.
- Cho J.E., Hwang S.Y. and Kim K.Y., 2006, Corrosion behavior of thermal sprayed WC cermet coatings having various metallic binders in strong acidic environment, Surface&Coatings Technology, 200, 2653–2662
- Corrosion-doctors, 2010, [www.corrosion-doctors.org](http://www.corrosion-doctors.org)

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Çakır A.F., 1989, Akımsız nikel kaplamalar ve uygulamaları, Korozyon Dergisi 1(2), 55-62
- Çakır A., 1990, Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü, Bileşim Matbaacılık Ltd. Şti., 391 s
- Davis J.R., 1997, Heat Resistant Materials, ASM İnternational, 591p
- Diltemiz S.F., 2010, Plazma sprej termal bariyer kaplamaların termal ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu, Doktora tezi, O.G.Ü. Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 103 s.
- Erdoğan M., Güneş İ. ve Develi F., 2006, Plazma sprej ve kullanım alanları, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 1, 61-66.
- Evcin A., 2006, Kaplama teknikleri ders notları, www.kimmuh.com
- Fedrizzi L., Rossi S., Cristel R. and Bonora P.L., 2004, Corrosion and wear behaviour of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium, Electrochimica Acta, 49, 2803-2814
- İbrahim A. and Berndt C.C., 2007, Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC-Co coatings and hard chrome plating, Materials Science & Engineering, 456, 114-119
- Jokinen P., Korpiola K. And Mahiout A., 1999, Duplex coating of electroless nickel and HVOF (high velocity oxygen fuel) sprayed WC-Co, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 9(2), 241-244
- Kaptan S., 2010, Termal sprej ve termal sprej yöntemi ile tungsten karbür ve seramik kaplama uygulamaları (yayımlanmamış)
- Khanna A.S., Kumari S., Kanungo S. and Gasser A., 2009, Hard coatings based on thermal spray and laser cladding, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 27, 485-491
- Kıratlı N., Yetgin S.H. ve Çöğür T., 2009, Toz alev püskürtme yöntemi kullanılarak alüminyum alaşımının aşınma ve sertlik davranışlarının incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 15, 3, 441-446.
- Leahey M.H., 2009, Replacement of hard chrome electroplating by tungsten carbide based high velocity oxygen fueled thermal spray, www.ewp.rpi.edu

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Legg K., 2002, Overview of chromium and cadmium alternative technologies, Surface Modification Technologies, XV
- Legg K. and Sauer J., 2000, Use of thermal spray as an aerospace chrome plating alternative, [www.rowantechnology.com](http://www.rowantechnology.com)
- Lima-Neto P., Correia A.N. and Silva G.P., 2006, Structural and morphological investigations of the electrodeposited Cr and Ni-Cr-P coatings and their electrochemical behaviors in the chloride aqueous medium, *J.Braz.Chem.Soc.*, 17, 7, 1419-1427
- Meyers B. and Lynn S., 1994, ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.
- Nascimento M.P., Souza R.C., Miguel I.M., Pigatin W.L. and Voorwald H.J.C., 2001, Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel, *Surface & Coatings Technology*, 138, 113-124
- Natishan P.M., Lawrence S.H., Foster R.L., Lewis J. and Sartwell B.D., 2000, Salt fog corrosion behavior of high-velocity oxygen-fuel thermal spray coatings compared to electrodeposited hard chromium, *Surface & Coatings Technology*, 130, 218–223
- Navinsek B., Panjan P. and Milosev I., 1999, PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes, *Surface & Coatings Technology*, 116–119, 476–487
- Newby K.R., 1994, ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.
- Orbel, 2010, [www.orbel.com](http://www.orbel.com)
- Picas J.A., Forn A. and Matthaus, 2006, HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves, *Wear*, 261, 477–484
- Plating Resources, 2010, [www.plating.com](http://www.plating.com)
- Prado R., 2009, Electrodeposition of nanocrystalline cobalt alloy coatings as a hard chrome alternative, 2009 DoD Corrosion Conference, Navair Public Release 09-776
- Rastegar F. and Richardson D.E., 1997, Alternative to chrome: HVOF cermet coatings for highhorse power diesel engines, *Surface&Coatings Technology*, 90, 156-163

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Rolled Alloys, 2010, [www.rolledalloys.com](http://www.rolledalloys.com)

Sanchez E., Bannier E., Salvador M.D, Bonache J.C, Garcia J.C., Morgiel J. And Grzonka J., 2009, Microstructure and wear behaviour of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coatings

Sankara Narayanan T.S.N., Krishnaveni K., Seshadri S.K., 2003, Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear and corrosion resistance, *Materials Chemistry and Physics*, 82, 771-779

Sartwell B.D., Legg K., Bodger B., 2004, Replacement of chromium electroplating on gas turbine engine components using thermal spray coatings, Cost and Performance Report

Sartwell B.D., Legg K., Bodger B., 2010, HVOF thermal spray coatings as an alternative to hard chrome plating on military and commercial aircraft, [www.p2pays.org](http://www.p2pays.org)

Sartwell B.D., Natishan P.M., Singer I.L., Legg K.O., Schell J.D. and Sauer J.P., 1998b, Replacement of chromium electroplating using HVOF thermal spray coatings, [www.hcat.org](http://www.hcat.org)

Shotpeener, Shotpeening overview, 2001, [www.shotpeener.com](http://www.shotpeener.com)

Special Metals, 2010, [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com)

Sulzer Metco Product & Services, 2010, [www.sulzer-metco.com](http://www.sulzer-metco.com)

Tafralı M., 2006, Isıl püskürtme yöntemleri, *Yüzey İşlem ve Kuşlama Dergisi* 10, [www.yuzeyislem-kuşlama.com](http://www.yuzeyislem-kuşlama.com)

Techmetals, Inc, 2010, [www.techmetals.com](http://www.techmetals.com)

Toma D., Brandl W and Marginen G, 2001, Wear and corrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings, *Surface & Coatings Technology*, 138, 149–158

Tondu S., Schnick T., Pawlowski L., Wielage B., Steinhäuser S. and Sabatier L., 2000, Laser glazing of FeCr-TiC composite coatings, *Surface & Coatings Technology*, 123, 247–251

Tucker, R.C., 1994, *ASM Handbook*, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.

Ünver C., 2010, Metal kaplamannın dünü bugünü, [www.yuzeyislem-kuşlama.com](http://www.yuzeyislem-kuşlama.com)



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Üneri S., 1998, Korozyon ve önlenmesi, Korozyon Derneği, Poyraz Ofset, 413s
- Voorwald H.J.C., Souza R.C., Pigatin W.L. and Cioffi M.O.H, 2005, Evaluation of WC-17Co and WC-10Co-4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel, *Surface & Coatings Technology*, 190, 155–164
- Wang L., Gao Y., Xu T., Xue Q, 2006, Corrosion resistance and lubricated sliding wear behaviour of novel Ni-P graded alloys as an alternative to hard Cr deposits, *Applied Surface Science*, 252, 7361-7372
- Wikipedia The Free Encyclopedia, 2010, [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)
- Yeşildal R., Günay Y.Z., 2007, Plazma sprej yöntemi ile kaplama ve sprej karakteristiklerinin incelenmesi, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 9, 1, 59-76.
- Yüksek E., Altuncu E., Şeker İ.Y. ve Üstel F, 2006, Plazma sprej kaplama yöntemi ve teknolojik uygulamaları, *Galvanoteknik Dergisi* 12.
- Yuzeyislemeler.com, 2010, [www.yuzeyislemeler.com](http://www.yuzeyislemeler.com)
- Ytmk (Yüzey Teknolojileri ve Mühendisliği Kulübü), 2010, [www.ytmk.sakarya.edu.tr](http://www.ytmk.sakarya.edu.tr)

## ÖZGEÇMİŞ

Elif Nazik ATABAY, 1977 Eskişehir doğumludur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini, Eskişehir Anadolu Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Çalışma hayatına İnci Hava İkmal Bakım Merkezi'nde başlamış olup halen orada devam etmektedir. Uçak motor parçalarına uygulanan kimyasal ve mekanik temizlemeler, kaplama sökümü, bilyeli dövme, boya, tahribatsız muayene, kaplama, arıtma, çevre yönetim sistemi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmektedir. Evli ve bir kız çocuğu annesidir.

Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi

Elif Nazik Atabay

DOKTORA TEZİ

EKLER

Ek 1. Her 1000 Çevrimde ki Ağırlık Kaybı Değerleri, g (g/1000)

Ek 2. Toplam Ağırlık Kaybı Değerleri (g)

EK 1. Her 1000 çevrimdeki ağırlık kaybı değerleri, g (g/1000)

Çevrim sayısı	A286	K	19	36	37	38	HVOF	36L	AN	19AN	36AN	37AN	38AN
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0,02665	0,0116	0,0999	0,1405	0,229067	0,1655	0,0338	0,08415	0,0145	0,0644	0,03575	0,0336	0,0273
2000	0,0091	0,00945	0,05725	0,072	0,073567	0,0677	0,00525	0,04885	0,01055	0,02345	0,02305	0,014	0,0171
3000	0,0054	0,0071	0,033133	0,0513	0,066267	0,0594	0,0042	0,0383	0,01085	0,02105	0,0194	0,0084	0,0088
4000	0,01705	0,00605	0,04335	0,0332	0,059967	0,0236	0,00125	0,03815	0,01485	0,0212	0,01885	0,0129	0,01315
5000	0,00995	0,00485	0,030467	0,0308	0,058267	0,0185	0,0021	0,03625	0,0087	0,0199	0,0147	0,01095	0,00835
6000	0,00475	0,00325	0,06035	0,05155	0,062233	0,0485	0,0022	0,0361	0,0102	0,02265	0,0201	0,0059	0,00995
7000	0,0167	0,0056	0,055967	0,0469	0,0543	0,02395	0,00105	0,04195	0,01465	0,01365	0,01575	0,00435	0,0071
8000	0,00685	0,00355	0,05265	0,0455	0,0442	0,0124	0,00265	0,0397	0,01075	0,0213	0,01425	0,01365	0,0047
9000	0,00715	0,00435	0,048533	0,0351	0,033633	0,0255	0,00075	0,04215	0,00765	0,02735	0,01355	0,00535	0,01065
10000	0,01385	0,00445	0,0449	0,04295	0,023333	0,0217	0,0026	0,04405	0,0164	0,0255	0,00975	0,00355	0,00395

EK 2. Toplam ağırlık kaybı değerleri (g)

Çevrim sayısı	A286	K	19	36	37	38	HVOF	36L	AN	19AN	36AN	37AN	38AN
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0,02665	0,0116	0,0999	0,1405	0,229067	0,1655	0,0338	0,08415	0,0145	0,0644	0,03575	0,0336	0,0273
2000	0,03575	0,02105	0,15715	0,2125	0,302633	0,2332	0,03905	0,133	0,02505	0,08785	0,0588	0,0476	0,0444
3000	0,04115	0,02815	0,190283	0,2638	0,3689	0,2926	0,04325	0,1713	0,0359	0,1089	0,0782	0,056	0,0532
4000	0,0582	0,0342	0,233633	0,297	0,428867	0,3162	0,0445	0,20945	0,05075	0,1301	0,09705	0,0689	0,06635
5000	0,06815	0,03905	0,2641	0,3278	0,487133	0,3347	0,0466	0,2457	0,05945	0,15	0,11175	0,07985	0,0747
6000	0,0729	0,0423	0,32445	0,37935	0,549367	0,3832	0,0488	0,2818	0,06965	0,17265	0,13185	0,08575	0,08465
7000	0,0896	0,0479	0,380417	0,42625	0,603667	0,40715	0,04985	0,32375	0,0843	0,1863	0,1476	0,0901	0,09175
8000	0,09645	0,05145	0,433067	0,47175	0,647867	0,41955	0,0525	0,36345	0,09505	0,2076	0,16185	0,10375	0,09645
9000	0,1036	0,0558	0,4816	0,50685	0,6815	0,44505	0,05325	0,4056	0,1027	0,23495	0,1754	0,1091	0,1071
10000	0,11745	0,06025	0,5265	0,5498	0,704833	0,46675	0,05585	0,44965	0,1191	0,26045	0,18515	0,11265	0,11105