

Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Sert Krom Kaplamalar ile Akımsız Nikel
Kaplama ların Tribolojik Performans larının Karşılaştırılması

Sevgin Gökel

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2023

Comparison of Tribological Performances of Hard Chrome Coatings and
Electroless Nickel Coatings Used in Aviation Industry

Sevgin Gökel

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2023

Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Sert Krom Kaplamalar ile Akımsız Nikel
Kaplamların Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması

Sevgin GÖKEL

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Ocak 2023

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Koray KILIÇAY danışmanlığında hazırlamış olduğum “Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Sert Krom Kaplamalar ile Akımsız Nikel Kaplamaların Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/01/2023

Sevgin Gökel

İmza

ÖZET

Amaç: Havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılan sert krom kaplamaların insan ve çevre sağlığına olumsuz etkileri sebebiyle terkedilmeye başlanması ile birlikte yerine alternatif bulma arayışları devam etmektedir. Ülkemizde havacılık sektörü, sektörün mevcut eğilimi doğrultusunda hareket etmektedir ancak bu konuda yeterli bir bilimsel çalışma yapılmadığı onun yerine sektörde etkin şirketlerin uygulamalarının takip edildiği görülmüştür. Bu çalışma ile amacımız bu alandaki boşluğu doldurarak iki farklı yüzey kaplama arasında ki farkları ve benzerlikleri değişik çelik türleri üzerinden tespit edebilmektir. Yapılan bu deneysel çalışma ile sert krom ve akımsız nikel kaplamalar karşılaştırılarak bir biri yerine kullanılabilirliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Yapılan deneysel çalışmada beş farklı tür çelik türünden toplam seksen dört adet kupon üretilmiş bu kuponların yarısına sert krom diğer yarısına ise akımsız nikel kaplama yapılarak bu kuponlar farklı parametrelere göre incelemeye tabi tutulmuştur.

Bulgular: Tribolojik performans testleri sonucunda sert krom kaplamalar kaplama kalınlığı, sertlik ve aşınma direnci yönünden akımsız nikel göre çok üstün olduğu tespit edilmiş ancak akımsız nikel kaplamalar üzerine ısıtma işlemi yapılarak bu özelliklerde iyileşme tespit edilmiştir. Bu sayede iki farklı kaplama türünde birbirine yakın sonuçlara ulaşılabilmektedir.

Sonuç ve Öneriler: Havacılıkta, sert krom kaplamaların esas kullanım amacı aşınma direncidir. Akımsız nikel sertlik ve aşınma direnci bakımından yeterli değildir. Öte yandan akımsız nikel kaplamalar üzerinde ısıtma işlemi yaparak sertlik ve aşınma direncinde iyileştirmeler yapılabileceği görülmüştür. Bu sonuçlar ile doğru altlık malzemeleri seçilerek ve ısıtma işlemi uygulanarak akımsız nikel kaplamalar, birçok yerde sert krom kaplamaya alternatif olabilir. Ancak iniş takımları gibi çok yüksek aşınma direnci istenen yerler için daha fazla deneysel çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: Sert Krom Kaplamalar, Akımsız Nikel Kaplamalar, Havacılık Malzemelerinin Kaplanması

SUMMARY

Purpose: With the abandonment of hard chrome plating, which is used extensively in the aviation industry, due to its negative effects on human and environmental health, the search for alternatives continues. The aviation sector in our country acts in line with the current trend of the sector, but it has been observed that there is not enough scientific study on this subject, instead the practices of active companies in the sector are followed. Our aim with this study is to fill the gap in this field and to determine the differences and similarities between two different surface coatings on different types of steel. With this experimental study, it was aimed to evaluate the usability of hard chrome and electroless nickel coatings instead of each other.

Method: In the experimental study, a total of eighty-four coupons were produced from five different types of steel, half of these coupons were coated with hard chrome and the other half with electroless nickel plated, and these coupons were examined according to different parameters.

Results: As a result of the tribological performance test, it has been determined that hard chrome coatings are much superior to electroless nickel in terms of coating thickness, efficiency and durability. On the other hand an improvement in these properties in the heat treatment structure on electroless nickel coatings. In this way, two different coating types were able to achieve close result.

Conclusion and Suggestions: In aviation, the primary use of hard chrome plating is wear resistance. Although electroless nickel coatings are very successful in some aspects, they are not sufficient in terms of hardness and wear resistance. On the other hand, it has been seen that improvements can be made in hardness and wear resistance by heat treatment on coatings. If the right base materials are selected and improvements are made, it can be used in aircraft oil, fuel and hydraulic units. It has been evaluated that there is a need for more detailed studies in places where there is a need for high wear resistance such as landing gear.

Keywords: Hard Chrome Plating, Electroless Nickel Plating, Coating of Aviation Material

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	8
2.1. Sert Krom Kaplamalar.....	8
2.1.1. Sert Krom Kaplama Prosesinin Teorisi	9
2.1.2. Sert Krom Kaplamaların Özellikleri.....	13
2.2. Akımsız Nikel Kaplamalar	16
2.2.1. Akımsız Nikel Kaplama Prosesi.....	19
2.3. Havacılıkta Sert Krom ve Akımsız Nikel Kaplamalarının Kullanım Yerleri	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Araştırma Yöntemi	25
3.2. Evren ve Örneklem/Çalışma Grubu	26
3.2.1. Örnek ham malzemelerin seçilmesi.....	26
3.2.2.. Test parçalarının üretim yönteminin seçilmesi.....	29
3.2.2.1. <u>Sert Krom Kaplamalar</u>	30
3.2.2.2. <u>Akımsız Nikel Kaplamalar</u>	34
3.2.2.3. <u>Isıl İşlem</u>	40
3.3. Veri Toplama Araçları.....	42
3.3.1. Makro Kalınlık Ölçme Cihazları	42
3.3.2. Sertlik Testi Cihazı	44
3.3.3. Test Numunesi Hazırlama Cihazları.....	45
3.3.3.2. <u>Kalıba Alma</u>	46
3.3.3.3. <u>Zımparalama</u>	47
3.3.3.4. <u>Parlatma</u>	48
3.3.3.5. <u>Dağlama</u>	50

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>sayfa</u>
3.3.3.6. <u>Görüntü Alma</u>	50
3.3.4. Korozyon Test Kabini	51
3.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	53
3.3.6. Aşındırma Test Cihazı	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	56
4.1. Verilerin Toplanması ve Çözümlemesi	56
4.1.1. Görünüş ve Yapışma Testleri	56
4.1.1.1. <u>Kuponların Görsel Kontrolü</u>	57
4.1.1.2. <u>Kaplamaların Kesit Görünüşleri</u>	60
4.1.2. Tahribatlı Testler	66
4.1.2.1. Bükme Testleri	66
4.1.2.1. Bükerek Kırma Testi	68
4.1.3. Kalınlık Ölçümleri	70
4.1.3. Mikro Sertlik Testleri	73
4.1.4. Korozyon Testleri	76
4.1.5. Aşınma Testleri	80
4.2.5.1. <u>AISI 321 Çeliğine Ait Aşınma Testleri</u>	81
4.2.5.2. <u>AISI 4340 Çeliğine Ait Aşınma Testleri</u>	89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR DİZİNİ	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Sert Krom Kaplama Banyosu Şematik Gösterim (Eriksson, 2014)	10
2.2. Sert Krom Kaplama Proses Akış Şeması	12
2.3. Mikro-Çatlaklar A- Kalın Kaplama, B- İnce Kaplama Kalınlığı (Eriksson, 2014)	14
2.4. Sert Krom Kaplı AISI 1010 Numunesi a-)10µm, b-)13 µm ve c-) 18 µm (El-Amoush & vd., 2011).....	15
2.5. Kaplama kalınlığı sertlik ilişkisi (El-Amoush & vd., 2011)	16
2.6. Elektrolitik Birikimli kaplama(sol), Oto-katalik Kaplama(sağ) arasındaki fark (Eriksson, 2014)	16
2.7. Kaplamalarının homojenliğinin karşılaştırılması (Çapkın, 2014)	18
2.8. Akımsız Nikel Kaplamalarda sıcaklık sertlik ilişkisi (Atabay, 2011).....	20
2.9. Çözeltisi Sıcaklığı ve Kaplama Miktarı/Hız İlişkisi (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)	21
2.10. İniş Takımlarında Sert Krom Kaplı Kısımlar (Devereaux, 2004).....	23
2.11. VP-30 İniş Takım Kapakları Silindirleri (Devereaux, 2004)	24
2.12. Çeşitli Sert Krom Kaplı Hidrolik Silindir Pistonları (Devereaux, 2004)	24
3.1. Test Kuponu İmalatı için oluşturulan 3D Model.....	26
3.2. Düşük Alaşımli çeliklere uygulanan İşlem Adımları	32
3.3. Yüksek Mukavemetli Çeliklere Uygulanan İşlem Adımları	32
3.4. Sert Krom Kaplama Hattı (1 HBFM).....	33
3.5. Elektrolitik Temizleme(Sol), Hidroklorik Asit ile Temizleme (Sağ).....	33
3.6. Sert Krom Kaplama İşlemi	34
3.7. Alaşımli ve düşük alaşımli Çeliklere Uygulanan Prosesler	36
3.8. AISI 4340 ve 4140 Çeliklerine Uygulanan Prosesler.....	36
3.9. Akımsız Nikel Kaplama Hattı (1HBFM)	37
3.10. Elektrolitik Temizleme İşlemi	38
3.11. Hidroklorik Asit ile Temizleme İşlemi.....	38
3.12. Durulama İşlemi	39
3.13. Akımsız Nikel Kaplama İşlemi	39
3.14. Isıl işlemde Sertlik ve Süre İlişkisi (Parkinson, 2001)	40
3.15. Abar Ipsen HR 34 Vakum Fırını (üstte), Isıl İşlem Gören Test Kuponları(altta)	41
3.16. Minitest 600B Kalınlık Ölçme Cihazı	42
3.17. Paint Test Equipment Kalınlık Ölçüm Cihazı	43
3.18. Buehler Micro Vickers 38647 Mikro Sertlik ölçme Cihazı	44
3.19. Metalurjik Laboratuvarı Numune Hazırlama İş Akışı.....	45
3.20. Strues Secotom-10 Kesme Cihazı	46
3.21. Buehler Simplimet 2000 Otomatik Kalıplama Pres Cihazı.....	47
3.22. Zımparalama ile Yüzeydeki Hasarın giderilmesi (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

3.23. Zımparalama ve Parlatma işlem Adımlarının Gösterimi (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)	49
3.24. Zımparalama ve Parlatma Cihazı	49
3.25. Nikon Dijital DS-Fi1 Kamera ve Optik Mikroskop	51
3.26. Tuz Sisi Püskürtme Sistemi (Jimmie Barnett, 2008).....	52
3.27. Singleton Marka Tuz Testi Kabini	53
3.28. Taramalı Elektron Mikroskobu	54
3.29. CSM instruments marka Aşındırma Cihazı.....	55
4.1. 301 Çeliğine ait kuponlar Akımsız Nikel(Sol), Sert Krom (Sağ).....	57
4.2. AISI 1020 Çeliğine ait Kuponlar A. Nikel (sol), Sert Krom (sağ).....	58
4.3. AISI 301 Çeliğine ait Kuponlar A.Nikel(sol), Sert Krom (Sağ)	58
4.4. AISI 4130 Çeliğine ait Kuponlar A.Nikel(sol), Sert Krom(sağ).....	59
4.5. AISI 4340 Çeliğine ait Kuponlar A. Nikel (Sol), Sert Krom(Sağ)	59
4.6. Kaplanan Test Kuponlarının Kalıpları	60
4.7. AISI 301 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	61
4.8. AISI 1020 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ) ...	61
4.9. AISI 321 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	61
4.10. AISI 4130 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)..	62
4.11. AISI 4340 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)..	62
4.12. AISI 301 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	62
4.13. AISI 1020 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	63
4.14. AISI 321 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	63
4.15. AISI 4130 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	63
4.16. AISI 4340 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)	64
4.17. AISI 4130 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü	64
4.18. AISI 1020 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü	64
4.19. AISI 301 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü	65
4.20. AISI 321 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü	65
4.21. AISI 4340 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü	65
4.22. Akımsız Nikel Test Kuponlarının Büküm Sonrası Görüntüleri	67
4.23. Sert Krom Test Kuponlarının Büküm Sonrası Görüntüleri.....	67
4.24. AISI 301 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme	68
4.25. AISI 1020 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme	69
4.26. AISI 321 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme	69
4.27. AISI 4130 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme	70
4.28. Kaplama Kalınlıkları Karşılaştırılmalı Grafik.....	72
4.29. AISI 4130 Mikro Sertlik Ölçüm İşleminden	74
4.30. Test Kuponlarının Kaplama Sertliklerinin Karşılaştırılması	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.31. 301 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ).....	77
4.32. AISI 4130 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ).	78
4.33. AISI 1020 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ).	78
4.34. AISI 321 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S.Krom (sol), A.Nikel (Sağ).....	79
4.35. AISI 1020(sol), AISI 4130(sağ) Krom Kaplı Numunelerde Korozyon	79
4.36. Kaplamaların Aşınma Testi Sonrası Görünümleri	80
4.37. Ana Malzemelerin Aşınma Testi Sonrası Görünümleri	81
4.38. AISI 321 Malzeme Grubuna ait Aşınma oranları ve Sürtünme Katsayıları.....	82
4.39-. AISI 321 Ana Malzeme a-)Aşınma izi genel, b-)Spot analizi, c-)Element Analizi...	83
4.40. AISI 321 Akımsız Ni a-)Aşınma izi genel, b-)Spot analizi, c-)Element Analizi	85
4.41. AISI 321 Ana Malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme Katsayısı ve Mesafe Grafiği..	85
4.42. AISI 321 Isıl İşlemlili Akımsız Ni a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi	86
4.43. AISI 321 Akımsız Nikel ve Isıl İşlemlili Akımsız Nikel Sürtünme Katsayısı ve Mesafe Grafiği.....	87
4.44. AISI 321 Isıl İşlemlili Akımsız Nikel ve Sert Krom Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği	88
4.45. AISI 321 Sert Krom a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi.....	88
4.46. AISI 4340 Malzemesine ait Aşınma oranları ve Sürtünme Katsayıları	89
4.47. AISI 4340 Ana Malzeme a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi	90
4.48. AISI 4340 Akımsız Ni, a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi .	91
4.49. AISI 4340 Ana malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği	92
4.50. AISI 4340 Isıl İşlemlili Akımsız Ni, a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi	93
4.51. AISI 4340 Akımsız Nikel ve Isıl İşlemlili Akımsız nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği.....	93
4.52. AISI 4340 Ana malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği	94
4.53. AISI 4340 Sert krom, a-)genel görüntü, b-)yakın görüntü, c-)element analizi	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sert Krom Kaplamalarda Tipik Kalınlıklar ve Kaplama süreleri (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)	13
2.2. Nikel Banyosundaki komponentler ve Fonksiyonları (Eriksson, 2014).....	19
3.1. Hazırlanan test kupon malzemelerinin özellikleri (MatWeb, 2022)	29
3.2. Maksimum Sertlik için Önerilen Isıl İşlem Uygulamaları (Parkinson, 2001).....	41
4.1. Test Kuponlarının Mikro Kaplama Kalınlıkları	71
4.2. Test Kuponlarının Kaplama Sertlik Değerleri.....	73
4.3. Ana Malzeme ile Kaplama Sertliklerin Kıyaslanması	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
C	Karbon
°C	Celcius
Cr	Krom
Cr ₂ C ₃	Krom Karbür
°F	Fahrenheit
Fe	Demir
Mn	Mangan
N	Newton
Ni	Nikel
O	Oksijen
P	Fosfor
Ra	Yüzey pürüzlülüğü
S	Sülfür
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
TiC	Titanyum Karbür
V	Vanadyum
W	Tungsten
WC	Wolfram Karbür/ Tungsten Karbür

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AMS	Havacılık Malzeme Özellikleri
ASTM	Test ve Materyaller için Amerikan Standartları
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
ENP	Akımsız Nikel Kaplama
EPA	Amerikan Çevre Koruma Ajansı
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
HV	Vickers Sertliği
HVOF	Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı
HRC	Rockwell C Sertliği
PH	Hidrojen Gücü
RoHS	Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması için Avrupa Birliği
Direktifi	
SAE	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T.O.	Teknik Emir (Technical Order)
USAF	ABD Hava Kuvvetleri
1 HBFM	1' inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Havacılık endüstrisi diğer endüstrilerden farklı olarak her zaman en kaliteli malzemeleri kullanmakla kalmamış en gelişmiş ve özel teknikleri hem kullanmış hem de bu teknolojilerin geliştirilmesinde öncü rol oynamıştır. Mühendislik malzemelerinin gelişimi de havacılık endüstrisine paralel olarak gelişmiştir. Havacılıkta kullanılan malzemelerin performanslarını iyileştirmek için çeşitli özel uygulamalar ile ana metallerin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmıştır.

En yaygın kullanılan özel proses alanlarından biri de yüzey kaplama prosesleridir. Metaller ve alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılan bu kaplamalar, en basit tabir ile ana metalin üzerini başka bir metal ile kaplamayı içermektedir. Yöntem olarak ise temel olarak elektro-kimyasal kaplama metodu, sıcak daldırma metodu, sıcak püskürtme metodu ile sherardizing metotlarını kapsamaktadır. Yüzey kaplama işlemleri ile ana metalin korozyon direnci ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini arttırabilmek her zaman birinci öncelik olmuştur.

Havacılık endüstrisinde kullanılan ve hava araçlarının bileşenlerini oluşturan parçalar, yüksek kalite malzemelerin çok özel üretim yöntemleri kullanılarak üretildiğinden görece pahalı parçalar olmuşlardır. Pahalı malzemeleri sürekli tedarik etmek yerine operasyonel giderlerden tasarruf etmek amacıyla havacılık endüstrisi, bakım konsepti olarak sistemde kullanılan ve raf ömrü bulunmayan en küçük parçaya kadar tamir edilebilirliği benimsemiştir. Hava aracının tüm bileşenleri yoğun ve planlı bir bakım işlemine tabii tutulmaktadır. Bakım operasyonları sırasıyla söküm, keşif (ölçümler, tahribatsız muayeneler vb.), yenileme (kaplama, makinalama, parça değişimi vb.), montaj, boya, test vb. işlemlerini içermektedir. Hava aracına ait iniş takımları, hidrolik silindirler, hidrolik valfler ve motor üzerinde bulunan yağ ve yakıt aksesuarlarının çalışan parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için sert krom, akımsız nikel, termal spre, kadmiyum, anodize vb. kaplama yöntemleri kullanılmaktadır.

Kaplamaların en üstün özelliklerinden birisi bakım esnasında kaplamaların ana metale zarar vermeden sökülerek tekrar uygulanabiliyor olmasıdır. Bu durum çalışmaya bağlı olarak zamanla yıpranan, aşınan ve zarar gören kaplamaların yenilenmesine imkân vermekte ve oldukça pahalı olan malzemelerin yeniden üretilmesinin önüne geçerek büyük tasarruf sağlamaktadır.

Elektro-kimyasal kaplama yöntemlerinden biri olan sert krom kaplama, kaplandığı ana malzemenin sertliğini, sürtünme, aşınma direncini oldukça arttıran ve maliyet avantajı bir kaplama yöntemidir.

Bütün bu sayılan olumlu özelliklerine rağmen sert krom kaplamanın insana ve çevreye olumsuz etkileri vardır. Krom kaplamalar için bu olumsuz etkilerin kaynağı kromun kendisi olmasa da kaplama çözeltisinde bulunan kromik asit kaynaklı hexavalent krom Cr^{+6} iyonudur. Bu iyon hem kanserojendir hem de solunum yolları üzerinden birçok sağlık problemine yol açmaktadır (Legg, 2002).

İngiltere’ de 1993-1995 yıllarında, 20 farklı krom kaplama şirketinde çalışan 71 kişi üzerinde yapılan bir araştırmaya göre çalışanların %23’ ünde egzama görülmekle birlikte rastgele seçilen 20 firmanın tamamında egzamalı hasta bulunmaktadır. Ayrıca çalışanların %17’ sinde aktif nazal inflamasyon görülürken %23’ ünde kalıcı nazal hastalık görülmüştür (Williams, 1996).

Yapılan bu çalışmalar değerlendirildiğinde, mühendislik uygulamalarında sağladığı tüm olumlu özelliklere rağmen sert krom kaplamalar çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilemiş dolayısıyla sert krom kaplama prosesinin yerine alternatif yöntem arayışlarına girilmiştir. Malzemenin kullanım yerine göre alternatif uygulanan yöntem değişmekle birlikte HVOF kaplama çoğunlukla havacılık uygulamalarında sert krom kaplamanın yerini almaya başlamıştır. Öte yandan bir diğer önemli elektro-kimyasal kaplama yöntemi olan akımsız nikel kaplama, sert kroma benzer özelliklere sahip, ana metalin korozyon ve aşınma dayanımlarını arttırmak amacıyla elektrik akımı olmadan tamamen kimyasal olarak yapılan bir kaplama yöntemidir. Birçok farklı endüstri akımsız nikel kaplamayı kullanmaktadır.

Havacılık endüstrisinde de özellikle uçak motor parçaları, yakıt üniteleri gibi birçok değişik kısımda kullanılmaktadır.

Akımsız nikel kaplama tekniğindeki farklılık sadece elektrik akımının kullanılmaması değildir. Bu yöntemle elde edilen kaplamada, nikel ağırlıkça %88-95 oranında olup beraberinde metal olmayan elementleri de yüzeye bağlamasıdır. Nikel iyonları ve birlikte sürüklenen fosfor gibi metal olmayan maddelerde kaplama yapısının içerisinde yer alırlar ve bunun sonucunda “metalik cam” adı verilen amorf bir tabaka oluşur. Mikro yapı incelendiğinde bütün metallerde mevcut olan tanelerin ve tane sınırlarının olmadığı görülür. Kaplama dokusu kristal ya da toz dokusunda olmadığından zamanla kristal yapıdaki boşlukların meydana getireceği galvanik hücrelerin oluşmasına imkân vermez. Diğer elektrolitik yöntem ile kaplanmış kaplamalar gibi kendi kendini kurban eden bir kaplama olmayıp, malzemeyi ortamdan tam olarak izole eden bariyer niteliğinde bir kaplamadır. Bu kaplamalar kendilerine has özellikleri ile endüstride belirli alanlarda rakipsiz, birçok alanda diğer tür kaplamalara tercih edilir hale gelmiştir (Küpeli & vd., 2008).

Problem durumu: havacılık endüstrisi özelinde barındırdığı özel emniyet ve güvenlik gereksinimlerinden dolayı çoğu zaman maliyetler ikinci plana atılmaktadır, bu duruma ek olarak malzemelerin aşırı zorlu çevre şartlarında çalışacak olması ve malzemelerin istenilen fonksiyonlarını en hafif ağırlık kısıdını sağlayacak şekilde yerine getirmeleri zorunluluğu, tasarım mühendislerinin işini zorlaştırmaktadır.

İster askeri isterse sivil olsun havacılık endüstrisi üretim maliyetleri diğer sektörlere kıyasla çok yüksek kaldığı için bakım işlemleri bu sektörde normalde olduğundan daha önemli bir konumdadır. Havacılık bakım sektörü hem ekonomik hem de teknolojik yatırımlar göz önünde bulundurulduğunda çok gelişmiş bir sektör olmuştur.

Büyük havayolları şirketlerinin ve devletlere ait askeri veya sivil havacılık kurumlarının bakım merkezlerinde fabrika seviyesi detaylı bakım faaliyetleri sürdürülmektedir. Bu merkezler minimum bakım maliyetlerini sağlamak amacıyla periyodik olarak veya arıza durumlarına göre hava araçlarının tüm komponentlerini yenileyerek yeniden servise sunmaktadırlar.

Bakım faaliyetlerinin bir parçası olan kaplama işlemlerinden sert krom kaplama işlemleri uzun yıllardan bu yana kullanılmaktadır. Ancak Avrupa ve Amerika’ da düzenlenen yasalar ile birlikte bu kaplama uygulaması yasaklanmıştır veya ağır düzenlemeler sebebiyle çok pahalı kurulum maliyetleri oluştuğundan uygulayıcı firmalar tarafından terkedilmeye başlanmıştır. Dünyada havacılık endüstrisine yön veren büyük firmalar ise sert krom kaplama yerine alternatif işlemler kullanmaya başlamışlardır. Büyük firmaların bu dönüşümü tüm bu havacılık ekosistemini de peşinden sürüklemiştir.

Türkiye’ de mevcut durumda sert krom kaplama faaliyetleri yoğun bir şekilde uygulanmaya devam etmektedir. Bununla birlikte hem dünyadaki mevcut eğilim hem de gelebilecek yasal düzenlemeler dikkate alındığında yıllara sâri olarak azalacağı ve yerini başka alternatiflere bırakacağı öngörülmektedir.

Bu sebeple havacılık alanında çalışan firmalar ve mühendisler bu sorunun çözümü için çalışmalar yapmakta ve alternatif yöntemler denemektedir. Bu çalışmaları yaparken aynı zamanda etkin kaynak kullanımı yaparak daha tasarruflu çözümler bulabilmek de önemli olduğunda HVOF gibi pahalı prosesler her zaman bütün problemi çözememektedir, daha maliyet etkin çözümlerin sunulmasına ihtiyaç vardır. Kullanılan parçanın çalışma koşulları göz önünde bulundurularak ihtiyaca göre hem mühendislik endişelerini giderecek hem de kaynak tasarrufu sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi için bilimsel çalışmaların sürdürülmesine ve endüstriye fayda sağlanmasına ihtiyaç vardır.

Araştırmanın amacı: bu tez çalışmasında, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan sert krom kaplamalar ile akımsız nikel kaplamalar arasında havacılık endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanılan beş farklı çelik türü üzerinden tribolojik performans karşılaştırılması yapılmıştır. Akımsız nikel kaplamanın sert krom kaplamaya göre üstün ve zayıf yanları belirlenerek hangi durum ve şartlarda sert krom kaplamalara alternatif olarak kullanılabileceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi: mühendislik faaliyetlerinin en önemli amacı bir malzemenin üretimini hem kaynakları minimum düzeyde kullanmak hem de kalite, emniyet ve ihtiyaca uygunluk kısıtlarına uyarak sağlayabilmektir. Bu sebeple bir mühendislik çalışmalarında son noktaya ulaşmak diye bir kavram yoktur aksine sürekli gelişme esastır.

Bir malzemenin üretimi esnasında tasarımın uygunluğu, malzeme seçimi ve üretim yönteminin tayini çok ciddi mühendislik bilgisi içeren zor süreçlerdir ancak teknolojinin gelişmesi ile birlikte gelişen ve çeşitlilik kazanan imalat metotları ve gelişen malzeme bilimi sayesinde ihtiyaçlara çok efektif çözümler bulunabilmektedir.

Üretim faaliyetlerinin bir önemli işlem adımı ise genellikle özel prosesler olarak tabir edilen yüzey işleme teknolojileridir. Yüzey işleme teknolojilerinin kullanımı özellikle son yüzyılda artarak ve gelişerek günümüze gelmiştir ve bu süreçte çoğu teknoloji güvenilirliklerini kanıtlamışlardır. Kaplama işlemleri uygulandıkları ana malzemelerin kullanım ömrünü her türlü mekanik özelliklerini arttırabilmek amacıyla kullanılırlar.

Tezimizin konusu olan iki kaplama türü sert krom kaplama ve akımsız nikel kaplamalar ise yaklaşık bir asırdır yoğun bir şekilde hem dünyada hem de ülkemizde yaygın olarak kullanılan kaplama çeşitleridir. Her iki kaplamada otomotiv, tekstil, inşaat, havacılık-uzay, denizcilik vb. birçok sektörde kendilerine geniş uygulama alanı bulmaktadır.

Havacılık endüstrisi, kendi özel ve zorlu şartları sebebiyle tarihsel bir misyon olarak üretim ve bakım teknolojilerini geliştiren bir rol oynamaktadır. Bir hava aracında hidrolik, yağ ve yakıt sistemlerinin bileşenlerinde, motor parçalarında, iniş takımlarında vb. hem sert krom hem de akımsız nikel kaplamalar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Sert krom kaplamalar özelinde teknik kaygılardan ziyade çevresel ve insan sağlığına verdiği zararlar nedeniyle bu kaplama uygulamasında azalmalar görülmektedir. Dünyada durum bu şekilde iken ülkemizde de gelişmeler yakından takip edilerek havacılık sektörü eğilimine genellikle uyulmaktadır. Havacılık endüstrisinde faaliyet gösteren büyük üretim ve bakım fabrikaları bu konuda gerekli dönüşümlerini başlatmışlardır. Ancak ülkemiz envanterinde görece daha yaşlı hava platformlarında sert krom uygulaması yaygındır. Havacılık endüstrisinin ileri kalite politikaları ve katı düzenlemeleri gereği üretici firmalar yaptığı teknolojik değişiklikleri raporlayarak kullanıcılar dâhil tüm paydaşlarıyla paylaşmak ve hatta ihtiyaç duyulan yerlerde teknik destek vermektedirler.

Literatür çalışmaları incelendiği sert krom kaplamalara alternatif yöntem geliştirme konusunda sayısız çalışma yapılmışken ülkemiz özelinde bu konuda birkaç örnek dışında hemen hiç çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu açığın kapatılması amacıyla bir çalışma yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde yaygın şekilde sert krom kaplamalar ile HVOF kaplamalar kıyaslanmıştır. Sert krom kaplamalar ile akımsız nikel kaplamaların hiç karşılaştırılmadığı fark edilmiştir. Hâlbuki sert krom kaplama yapan çoğu kurum aynı zamanda akımsız nikel ve diğer kimyasal kaplama kabiliyetlerine de sahiptir. Diğer taraftan HVOF kaplama uygulaması yeni bir teknoloji olması sebebiyle kurumların bu teknolojiyi elde edebilmek için yeni yatırımlar yapma zorunluluklarını bulunmaktadır. Bu teknolojinin üretimi, yabancı şirketler tarafından yapıldığı ve maliyetleri göz önüne alındığında bu dönüşümün ülke ekonomisini olumsuz etkileyeceği değerlendirilmektedir.

Ülkemizde de sert krom kaplama faaliyetleri yurtdışı örneklerinde olduğu gibi olumsuz etkileri sebebiyle her an yasal düzenlemelere ve kısıtlamalara gidebileceği değerlendirilmektedir. Bu sebeple sert krom kaplamaların ve akımsız nikel kaplamaların birbirleri yerine kullanılabilirlik durumlarının incelenmesi, kullanım yerlerinin uygun olduğu alanların belirlenebilmesi için eksiklik olduğu düşünülen bu alanda, deneysel bir araştırma yaparak özelde havacılık endüstrisi genelde ise diğer endüstri dallarının da işine yarayacak bir referans oluşturulması amaçlanmıştır.

Sınırlılıklar: havacılık endüstrisinde kullanılan sert krom ve akımsız nikel kaplamalarının uygulandığı ana metaller çok çeşitlidir. Bu ana metallerin türü, sınıfı vb. özellikleri bazı üretici firmalar tarafından bakım dokümanlarında paylaşılmıştır. Ana malzeme detay bilgisi bulunmayan parçaların türü ise tahribatlı muayene veya elektron mikroskobu altında inceleme yapılarak tayin edebilmektedir ancak bu kaplamaların uygulandığı bütün metal sınıflarını deneysel çalışmaya dâhil edebilmek mümkün değildir. Bu yüzden net şekilde havacılık endüstrisinde kullanıldığı bilinen malzemelerden farklı fiziksel özellikler taşıyanlar üzerinden örneklem oluşturularak test kuponları oluşturulmuştur.

Kaplama yapılan test kuponları üzerinde testler yapılırken bu testlerin sayısını çeşitlendirmenin neredeyse sınırı yoktur. Bu sebeple bu araştırma test adımları belirlenirken QQ-C-320B, AMS-2406-N, SAE-AMS-OO-N-90 ve USAF T.O. 42C2-1-7 standartlarında belirtilen ve kaplama banyosu hazırlanmıştır. Üretime başlanmadan önce test kuponları üzerinden kalite testlerinin uygulandığı ve kaplama işlemine başlanmasına izin verilen kalite testleri esas alınarak çalışma sürdürülmüştür.

İki farklı kaplama türünü incelemeye alırken verimli ve doğru sonuçlara ulaşabilmek için karşılaştırılan her parametrenin mümkün olduğunca birbirine yakın olması doğru bir değerlendirme yapılabilmesi için olmazsa olmazdır. Sert krom kaplamalar ile akımsız nikel kaplamalar arasında benzerlik kurulamayacak en temel fark kaplama kalınlığı olduğu söylenebilir. Sert krom kaplamalarda daha kalın kaplamalar elde etmek mümkünken akımsız nikel kaplamalarda belli bir kalınlığın üzerine çıkmak mümkün değildir. Bunun yanında akımsız nikel kaplamanın en olumlu özelliklerinden biri olan kaplama kalınlığının homojen dağılması sert krom kaplamalarda o derece mümkün değildir. Bu sebeple standartlarda kabul edilen sınırlar dâhilinde ve karşılaştırmanın en sağlıklı koşullarda yapılabilmesi için çalışmada bu değerlerin olabildiğince birbirine yakın olmasına gayret edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hava araçlarının malzemelerinde kullanılan sert krom ve akımsız nikel kaplamalar; motor parçaları, uçuş kontrol üniteleri, hidrolik üniteler, iniş takımları vb. birçok farklı yerde kullanılmaktadır. Krom, mavimsi beyaz renkte, sert ve dayanıklı bir metaldir. Nikel, kendine has gümüş renkte yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek korozyon direnci olan bir geçiş metalidir.

Sert krom ve akımsız nikel kaplama işlemleri sayesinde;

- Malzemelerin aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Sıcaklık direnci,
- Sertlik gibi değerleri artırılmaktadır.

Yapılan bu kaplama işlemlerinden her ikisi de sahip oldukları benzersiz özellikler sayesinde sadece havacılık endüstrisinde değil hemen her sektörde yaygın ve yoğun şekilde kullanılmaktadırlar.

2.1. Sert Krom Kaplamalar

Sert krom kaplamalar, aynı zamanda fonksiyonel, endüstriyel veya mühendislik krom kaplaması olarak da bilinmektedir. Sert krom kaplamalar, ana malzemeyi kullanım koşullarına ve ihtiyaca göre yüksek sıcaklık ortamlarına, aşınmaya veya darbelere karşı korumak amacıyla yapılmaktadırlar. Havacılık, otomotiv, çelik ve diğer mühendislik endüstrileri bu kaplamayı elli yıldan fazla süredir kullanmaktadırlar. Bu kaplamanın uygulandığı ana malzemeye sağladığı birçok fayda vardır bu faydalardan en baskın olan iki tanesi, aşınma ve korozyon direnci olarak tanımlanabilir. Uygulandığı ana malzemenin kullanım ömrünü arttırmakta ve zorlu çevre şartlarında başarılı sonuçlar alınmasını sağlamaktadır.

Krom kaplamalar, dekoratif krom kaplamalar ve sert krom kaplamalar olarak ikiye ayrılır. Endüstride daha çok estetik amaçlar ile kullanılan dekoratif krom kaplamalar ile

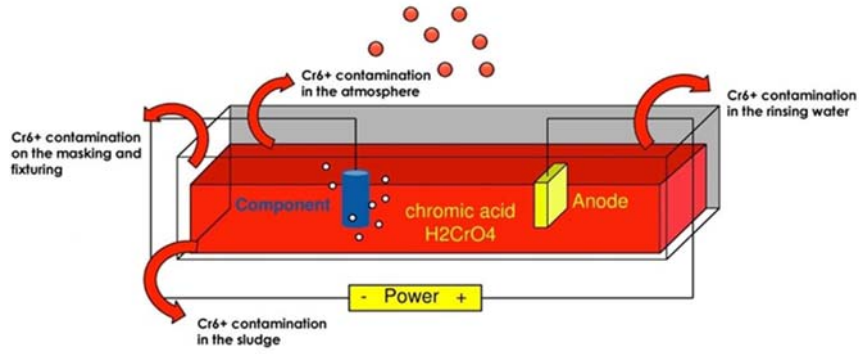
endüstriyel krom kaplamalar birbirlerine karıştırılsa da özellikleri ve kullanım amaçları birbirlerinden oldukça farklıdır. Dekoratif krom kaplamaların esas amacı görsellik iken sert krom kaplamaların görünüm veya estetik kaygılar söz konusu değildir.

Dekoratif krom kaplamalar ile sert krom kaplamalar karşılaştırıldığında;

- Sert krom kaplamalar parçaların işlevselliğini ve kullanım ömürlerini arttırmak ve parçaların aşınma dirençlerini arttırarak yüzeylerin sürtünme katsayılarını azalmaktır. Ayrıca hasarlandığı zaman parçaları tamir etmek ve kullanımdan kaynaklanan kusurları giderip tasarım ölçülerine getirerek yeniden kullanımını sağlamaktır.
- Dekoratif krom kaplama kalınlık ölçüleri $1.3\mu\text{m}$ ' den küçük olmakta iken sert kromda bu kalınlık $2.5\text{-}500\mu\text{m}$ arasında değişmektedir
- Bazı istisnalar dışında, dekoratif krom kaplaması nikel ya da bakır astar kaplamalarının üzerine atılırken sert krom ise ana metala uygulanmaktadır (Cotell, Sprague, & Smid, 1994).

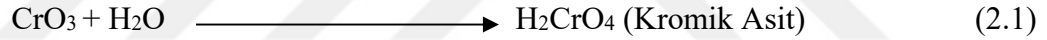
2.1.1. Sert Krom Kaplama Prosesinin Teorisi

Krom kaplama solüsyonu; kromik asit(CrO_3), su ve katalizör görevi görmesi için bir veya birden fazla asitten oluşmakta yaygın olarak sülfat ve Florür kullanılmaktadır. Başarılı bir operasyon için kromik asidin toplam katalizör asitlerine oranı belli bir sınırdan kalmalıdır. Tercihen katalizör asitlerinin kromik aside oranı $1/100$ olmalıdır. Krom kaplama banyolarında akım verimi düşük olmasına rağmen (parlak bir levha için genellikle %10-20 aralığında), kullanılabilecek nispeten yüksek akım yoğunlukları sayesinde oldukça yüksek bir çökelme hızı elde edilmektedir. Gerekli voltaj ise diğer elektro-kaplama işlemlerinin çoğundan daha yüksektir. Çalışma koşullarına bağlı olarak genellikle 4 - 10 V aralığındadır. Sonuç olarak, krom kaplama için gereken elektrik enerjisi, diğer birçok metal kaplamaya göre daha yüksektir, ancak bu dezavantaj, işlemin yaygın olarak kullanılmasını ciddi şekilde engellememiştir. Bir kromik asit çözeltisinin maksimum iletkenliği 50 - 60 oz/gal'lik bir konsantrasyona ulaşılan kadar elde edilemez. Ticari krom kaplamada, tatmin edici birikintiler için iyi akım veriminin yanı sıra iyi bir iletkenlik elde etmek için genellikle 20 - 35 oz/gal kromik asit içeren banyolar kullanılır. Küçük miktarlarda krom (Cr III) ve demir ve bakır gibi metalik kirletici maddeler iletkenliği azaltır (Svenson, 2006)

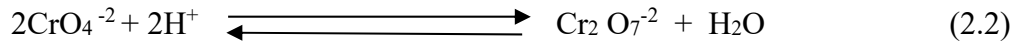


Şekil 2.1. Sert Krom Kaplama Banyosu Şematik Gösterim (Eriksson, 2014)

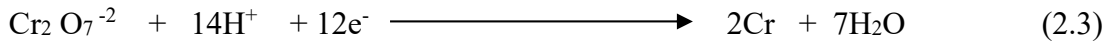
Prosesi kimyasal yönden biraz incelendiğinde, sert krom kaplama prosesi aslında bir elektro kaplama işlemidir. Şekil-2.1’ de görüldüğü gibi kaplanacak iş parçasını katot olarak eksi, uygun bir anot seçilerek artı kutup, kaplamadaki krom kaynağını ise çözeltidir (kromik asit). Dışarıdan haricen verilen bir enerji ile işlem başlatılır ve kaplama gerçekleşir. Piyasadan tedarik edilen kromik asit denilen ürün aslında krom-trioksittir oda zayıf bir asit türüdür ancak suda çözündüğünde kromik asit formunu alır.



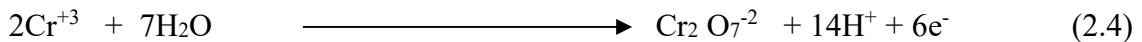
2CrO_4^{-2} iyonları $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ iyonları ile denge tepkimesi aşağıdaki gibidir;



Öncelikle katottaki reaksiyonu ele alalım, kaplanacak olan ana malzemeye gönderilen elektronlar krom tuzunu metalik kroma indirger bu tepkimenin denklemi aşağıdaki gibidir;



$\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ Anyonunda Cr elementinin değeri +6’ dır. Aşağıdaki tepkimede oluşan Cr(VI) iyonu Cr(III)’ e indirgenir. Cr^{+3} oksijen ile tepkimeye girerek anot yüzeyinde Cr^{+6} kompleks tuzunu oluşturur, tepkime aşağıdaki gibidir.



(Svenson, 2006)

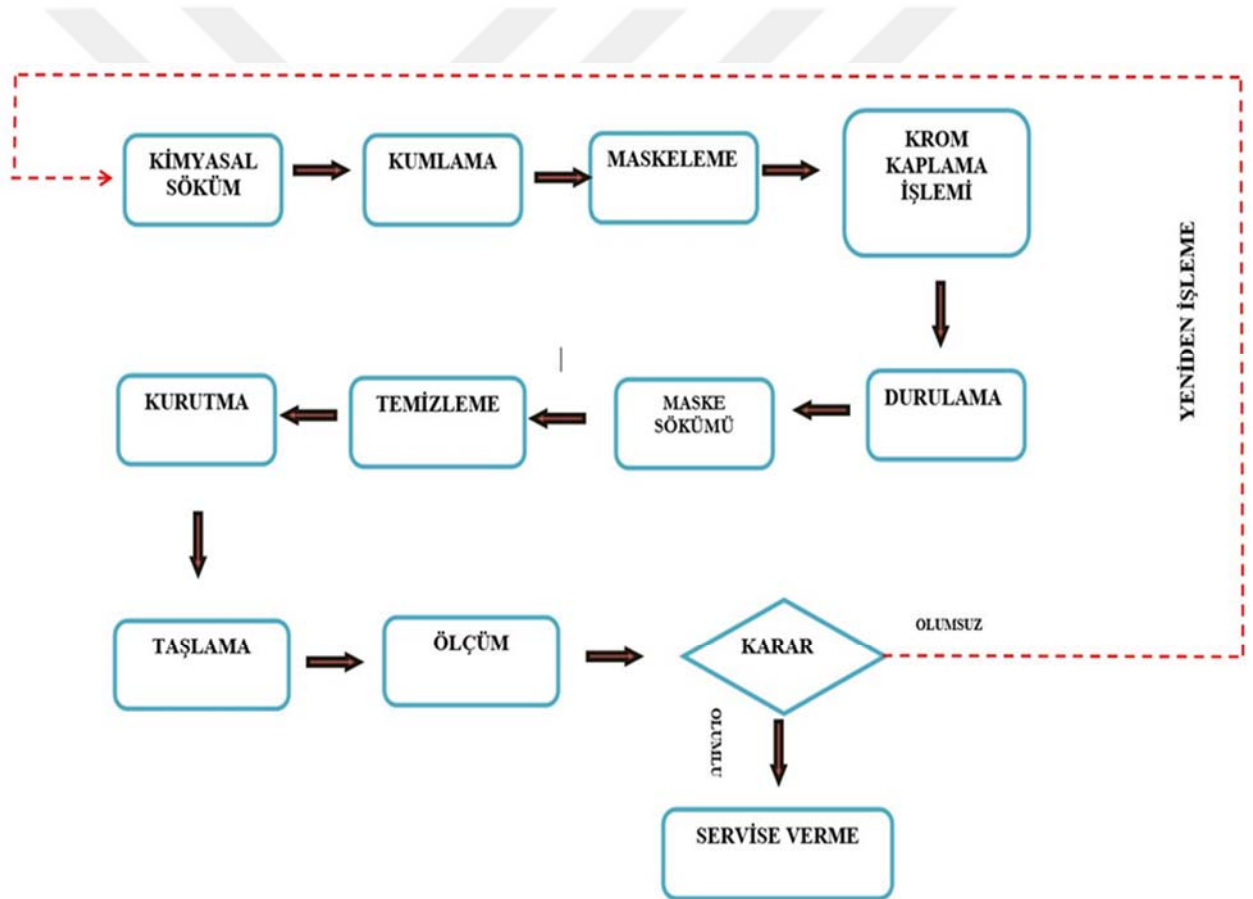
Ana metal üzerine krom kaplama yapılırken, banyodaki krom kaybı ilave kromik asit eklenerek tamamlanır. İyi bir kaplama yapılabilmesi için kromun reaksiyon ortamında kompleks tuzu olarak bulunması gerekmektedir. Metalik krom anot olarak kullanılır ise bu tuzu oluşturmak için çözünmez bu sebepten anot yüzeyi çözünmez kurşundan seçilmektedir ayrıca saf krom anotların kullanılması halinde anot elektrolit çözeltisinde tam verimle çözüneceğinden banyo içinde sürekli krom birikir oysa banyo tipine bağlı olarak birikinti sadece %15-35 verimle gerçekleşmektedir. (Svenson, 2006)

Sert Krom kaplamalar 2007 yılında Amerika’ da Enviromental Protection Agency (EPA) tarafından çevreye zararlı proses olarak tanımlanmıştır. Aynı yıl European Union directive Restriction of Hazardous Substances(RoHS) tarafından da yasaklanmıştır. Bu kısıtlar ve yasaklar sert krom kaplama yapan firmaları daha yüksek güvenlik önlemleri almaya zorlamıştır, yüksek kısıtlamalar nedeniyle artan maliyetler sektörü farklı alternatifler aramaya itmiştir. (Eriksson, 2014)

Sert krom kaplamalar yapılırken banyo çözeltileri işlem adımları aynı olsa bile iki tür uygulama vardır bunlardan bir tanesi sıfır üretimi yapılan malzemedir ki bu durumda yapılan üretimden önce yapılan tasarımda belirlenen kaplama kalınlığına göre iş adımları tek tek planlanır makinalama işlemleri sonrası nihai ölçüye getirebilmek için taşlama işlemi yapılarak proses tamamlanır.

Diğer yöntem daha çok bakım tesislerinde kullanılan mevcut ürünün tamiri amaçlıdır. Bu durumda işlemler ana malzeme üzerinde kusurları bulunan mevcut bir kaplama olduğundan önce mevcut istenmeyen kaplamanın sökümüyle başlar, söküm işlemi istenirse mekanik olarak taşlama işlemi ile veya kimyasal söküm yöntemleri kullanılarak yapılabilir. Ana metale kaplamaların daha iyi tutunmasını sağlamak için kumlama(shot-peen) işlemi yapılarak ana metalin çıplak yüzeyinde pürüzlülüğün artırılması sağlanması kaplamanın ana metale yapışmasını arttıracaktır. Kaplama işlemine başlamadan önce parçanın kaplama yapılmasının istenmediği kısımları var ise bu kısımlar maskelenmelidir, maskeleme işlemi balmumu şeklinde özel malzemelerden yapılmaktadır. Krom kaplama işlemi parçanın krom banyosuna yerleştirilmesi başlatılır. Kaplama kalınlığı çoğunlukla istenilen kalınlık üzerine taşlama payı bırakılarak fazla yapılmaktadır. Kaplama kalınlığı ana malzemenin banyo içinde tutulma süresi ile orantılıdır. Kaplama tamamlandıktan maske

sökümü, temizleme, kurutma işlemleri yapılır, burada ihtiyaca göre özellikle sertliği 40 HRC değerinin üzerinde olan yüksek mukavemetli çelikler hidrojen gevrekliğinin alınması için fırınlama işlemine tabi tutulabilir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra kaplama artığı olarak parçanın geometrisine göre oluşan çapaklar temizlenir ve iş parçası nihai ölçüye gelmesi için taşlanır. Prosesi tamamlanan parçanın servise verilebilmesi için ölçü kontrolü yapılır ve kaplama üzerinde mikro çatlakların olabilmesi ihtimaline göre parçaya tahribatsız muayene yöntemlerinden sıvı penetrant yöntemi ile çatlak kontrolü yapılır. Bu ölçüm işlemlerinden sonra bir aksaklık ihtimalinde yeniden işlemleri yapmak üzere işlem başlatılır bir aksaklık olmadığı takdirde iş parçası servise verilmektedir. Sert krom kaplama proses akış şeması Şekil-2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2. Sert Krom Kaplama Proses Akış Şeması

2.1.2. Sert Krom Kaplamaların Özellikleri

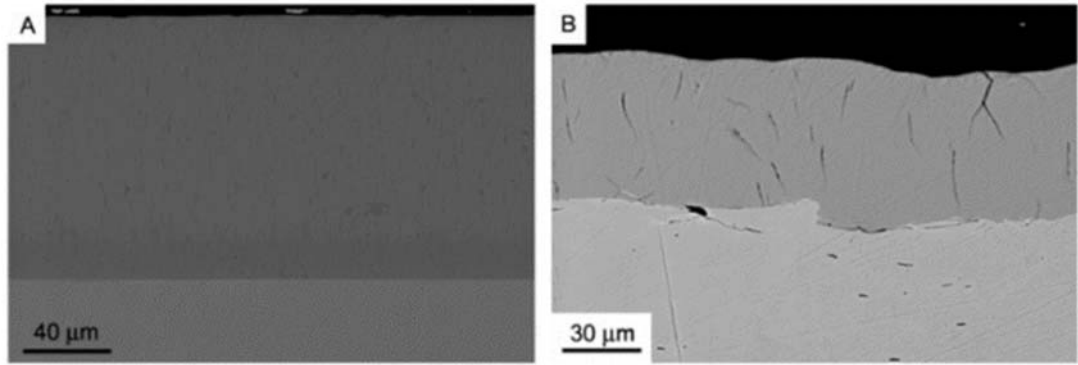
Sert krom kaplamaların majör uygulama amacı aşınma direncidir. Ana malzemenin kullanım ömrünü arttırmak, performansını iyileştirmek ve kurtarılmasını sağlamak üzere yapılmaktadır. Çizelge-2.1’ de sert krom kaplamalarının bazı uygulama alanları, kaplama kalınlıkları ve uygulama süreleri verilmiştir. Uygulama süreleri banyoların verimliliği artırılarak düşürülebilmektedir (Cotell, Sprague, & Smid, 1994).

Çizelge 2.1. Sert Krom Kaplamalarda Tipik Kalınlıklar ve Kaplama süreleri (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)

Parça Adı	Ana Metal Türü	Kaplama Kalınlığı		Kaplama süresi
		μm	mils	
Emniyet Valfi Pistonu	1113 çelik, soft	100	4	60 dk
Uçak Motoru Parçaları	Nikel Bazlı alaşımlar, Yüksek Mukavemetli Çelikler	75-180	3-7	10 saat
Dövme ve Çekme kalıpları	Çelik	25	1	60 dk
Küresel Valfler	Pirinç veya Çelik	7.5-13	0.3-0.5	20 dk
Hidrolik silindir	1045, çelik	13	0.5	40 dk
Silindir	Dökme Demir	255	10	300 dk
Namlu,	Çelik	25	1	40 dk
Krankşaft	Çelik	255-3800	10-150	...
Kesici Takımlar	Takım Çelik	1.3	0.05	5 dk

Sert kromun yüksek sertliği, atomik hidrojenin kaplama işlemi sırasında çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sert krom kaplama, yüksek kalite için popüler bir kaplamadır. Aşınma uygulamaları, yüksek sıcaklıklarda, sertlik kaybı nedeniyle azalır atomik hidrojen ise artan gözenekliliğe katkıda bulunan bir faktör olabilir, çünkü oksijen kaplamaya daha fazla yayılabilir. Her türlü krom oksijeni eker ve harici bir koruyucu oksijen tabakası (Cr_2O_3) oluşturur, Bu oksijen tabakası, sert kromun aşınma direncini ve korozyon direncini artırır. (Eriksson, 2014)

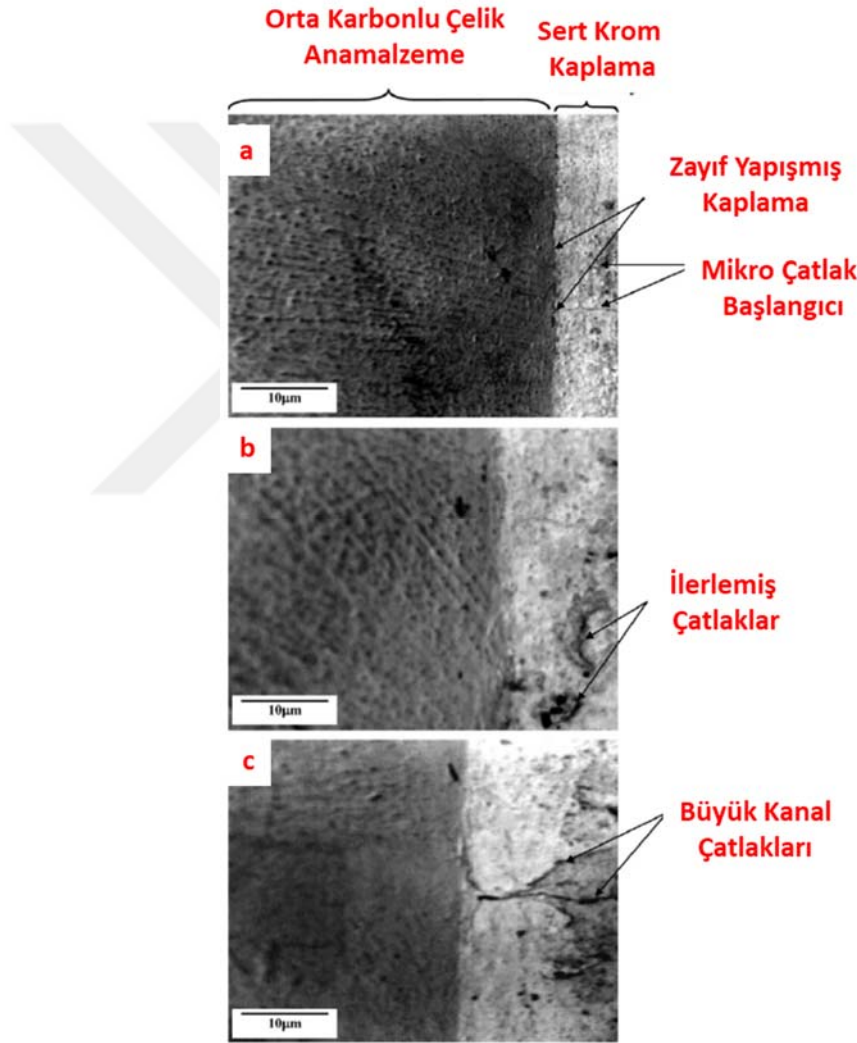
(Eriksson, 2014), yaptığı çalışmada sert krom kaplamalarda mikro çatlaklar çok sık görölmektedir. Bunun nedeni tam olarak anlaşılamasa da bir teoriye göre bu çatlakların sebebi iç çekme gerilmelerinin gevşemesiyle olduğunu, bu gevşemenin ise atomik hidrojenin emilmesiyle kaplamanın gevrekleşmesi ve kırılmaya bağlı çatlamaların ortaya çıkmasına bağlamaktadır. Kaplama kalınlığı arttığı mikro çatlakların yoğunluğu da azalmaktadır. Sertlik, korozyon direnci ve yorulma ömrü mikro çatlaklardan olumsuz etkilenmektedir. şekil 2.3' de kalın kaplama ile ince kaplama içinde mikro çatlakların kesit görünümü verilmiştir



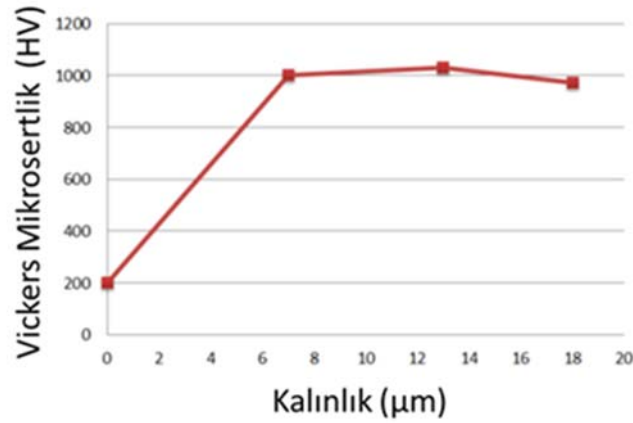
şekil 2.3. Mikro-atlaklar A- Kalın Kaplama, B- İnce Kaplama Kalınlığı (Eriksson, 2014)

Sert krom kaplamanın sertliği, kaplama işlemi esnasında atomik hidrojenin çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple aşınmaya karşı bir uygulama yapılacağı zaman sert krom kaplama oldukça popülerdir. Yüksek sıcaklıklarda atomik hidrojen kaybından dolayı sertlikte düşer (Eriksson, 2014).

(El-Amoush & vd., 2011) AISI 1010 çeliğinin ana malzeme ve sert krom kaplanmış numunelerini kayma mesafelerini değerlendirdiği çalışmasında 7,5 μm , 13 μm ve 18 μm kaplanmış sert krom kaplı numuneleri kalınlık-mikro çatlak, kalınlık-mikro sertlik yönüyle incelemiştir. Düşük kaplama kalınlıklarında mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Görseller, Şekil-2.4' de verilmiştir. Mikro sertlik değerlendirmesi ise 13 μm kalınlığa kadar artış göstermekte daha sonrasında ise aşağıdaki grafikte görülebileceği düşmeye başlamaktadır. Sert krom kaplamaların sertliği 600-1200 HV arasındadır. Kalınlığı ve sertlik ilişkisi Şekil-2.5'te verilmiştir.



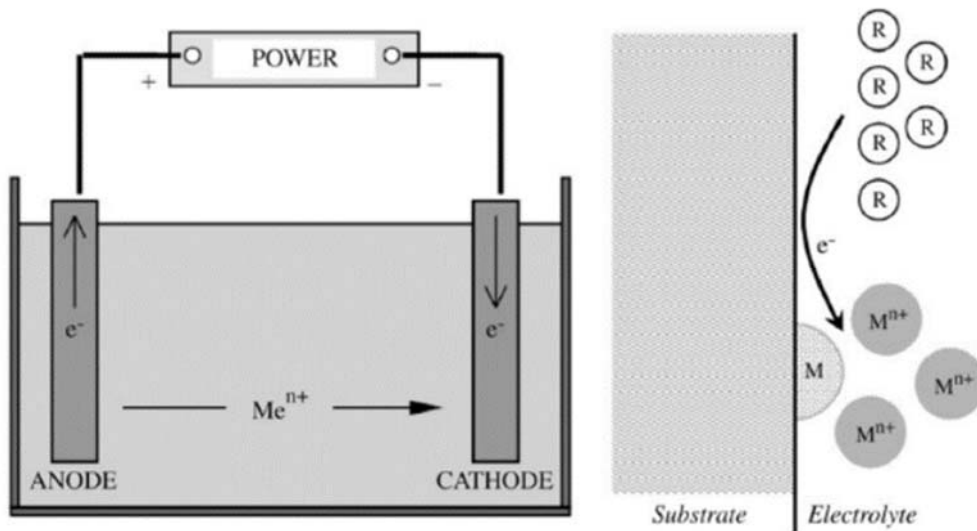
Şekil 2.4. Sert Krom Kaplı AISI 1010 Numuesi a-)10 μm , b-)13 μm ve c-) 18 μm (El-Amoush & vd., 2011)



Şekil 2.5. Kaplama kalınlığı sertlik ilişkisi (El-Amoush & vd., 2011)

2.2. Akımsız Nikel Kaplamalar

Akımsız nikel kaplamalar; 1940 yılında Brenner ve Riddel tarafından geliştirilmiş bir kaplama tekniğidir. Bu teknik akım birikimli kaplama yöntemlerinden farklı olarak harici bir güç kaynağı içermemektedir. Harici güç kaynağı kullanılmayan bu tip kaplamalara oto-katalitik reaksiyon denir ve burada akım elektrolitteki kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Eriksson, 2014). İki kaplama türü arasındaki fark aşağıda Şekil-2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Elektrolitik Birikimli kaplama(sol), Oto-katalitik Kaplama(sağ) arasındaki fark (Eriksson, 2014)

Akımsız nikel kaplamalar endüstride dekoratif ve mühendislik amaçlar ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Dekoratif uygulamalar mevcut nikel kaplama uygulamalarının %80' ini mühendislik amaçlı uygulamalar ise %20 ' sini oluşturmaktadır. Dünya genelinde kaplama amaçlı nikel tüketimi yıllık yaklaşık 81700 ton olup bu değer toplan nikel tüketiminin %11-12' sine tekabül etmektedir (Cotell, Sprague, & Smid, 1994).

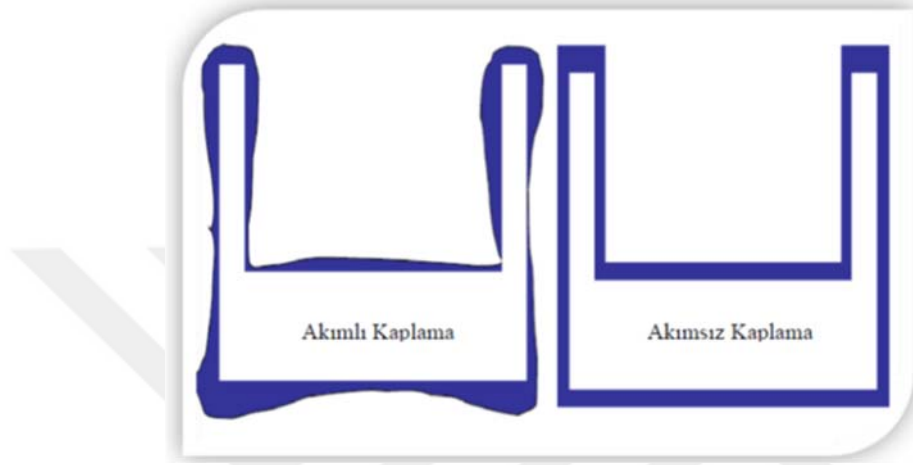
Havacılık ve uzay endüstrisinde ise iniş takımı parçaları, motor komponentleri, statorlar, aralayıcılar (spacers), hava kesiciler (air seals), pompalar, dikmeler, cayrolar, füze sistem parçaları, pistonlar, valf komponentleri, yataklar vb.de kullanılır (Atabay, 2011)

Metaller, polimerler, katı yağlayıcılar veya seramikler gibi farklı malzeme gruplarında akımsız nikel tribolojik performansları iyileştirmek için kullanılmaktadır. Akımsız nikel kaplamalara fosfor veya boron gibi malzemeler eklenerek akımsız nikelin farklı birikimleri elde edilebilmektedir. Bu Malzemeleri gruplandırmak gerekirse;

- Saf Nikel
- Akımsız nikel alaşım kaplamaları
 - Alkali, Nikel-Fosfor
 - Asit, Nikel-Fosfor
 - % 3-5 P (düşük fosfor, Low Phosphorus (LPEN))
 - % 6-9 P (orta fosfor, Medium Phosphorus (MPEN))
 - % 10-14 P (yüksek fosfor, High Phosphorus (HPEN))
 - Alkali, Nikel-bor
 - Asit, Nikel-bor
 - Üçlü-Dörtlü Alaşım
- Akımsız Nikel Birikimli Kaplamalar
 - Nikel Fosfor Kompozit (Ni-P-X)
 - Nikel-Bor kompozit (Ni-B-X)
 - X = Al₂O₃, ZrO₂, SiC, C, PTFE
- Akımsız Nikel Nano Kaplamalar (Sudagar & vd., 2013).

Akımsız nikel kaplamaların diğer ayırt edici ve olumlu özelliği ise bu kaplamalar şekli zor olan ana parçaların her noktasına nüfuz edebilmektedir ve homojen, mükemmel korozyon direnci, yüksek sertlik, aşınma direnci, sürtünme direnci, parlaklık, öz direnç,

lehimlenebilirlik, özellikleri bakımından çok fonksiyonel bir kaplama çeşididir. Akımsız nikel kaplamada harici bir enerji kaynağı kullanılmadığından kaplama ana metale homojen bir şekilde dağılmaktadır bu durum Şekil-2.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kaplamalarının homojenliğinin karşılaştırılması (Çapkın, 2014)

Akımsız nikel kaplamanın avantajları ve kısıtları

Avantajları;

- ❖ Mükemmel kaplama homojenliği
- ❖ Aşınma ve korozyona karşı güzel direnç
- ❖ Lehimlenebilirlik
- ❖ Düşük işçilik maliyetleri

Kısıtları;

- ❖ Elektro-kaplamaya göre yüksek kimyasal maliyet
- ❖ Kırılganlık
- ❖ Nikel-Fosfor birikimlerinden dolayı düşük kaynak edilebilirlik
- ❖ Elektro-kaplama yöntemlerine göre yavaş kaplama hızı (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)

2.2.1. Akımsız Nikel Kaplama Prosesi

Akımsız nikel kaplama, dışarıdan harici bir elektrik akımı olmadan ana malzeme üzerine nikel biriktirmektir. Kaplama nikel iyonlarının hipofosfit, aminoboran veya borohidrit bileşikler tarafından oto-katalitik bir kimyasal indirgenmesiyle biriktirilir. Elektrik olmadan nikel biriktirmek için iki farklı ticari uygulama bulunmaktadır. İlk yöntem 70 °C sıcaklığındaki nikel klorür ve borik asit çözeltilerine çeliğin daldırılmasıyla diğer yöntem ise 180 °C sıcaklıkta nikel karbonil buharının ayrışması şeklinde yapılmaktadır (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)

Akımsız nikel kaplama banyoları genellikle, nikel-fosfor, sodyum-hipofosfit ve diğer kimyasallardan oluşmaktadır. Bütün kimyasallar farklı fonksiyonlara sahiptir, bu komponentlerin isimleri ve fonksiyonları aşağıdaki Çizelge 2.2' de sunulmuştur. (Eriksson, 2014)

Çizelge 2.2. Nikel Banyosundaki komponentler ve Fonksiyonları (Eriksson, 2014)

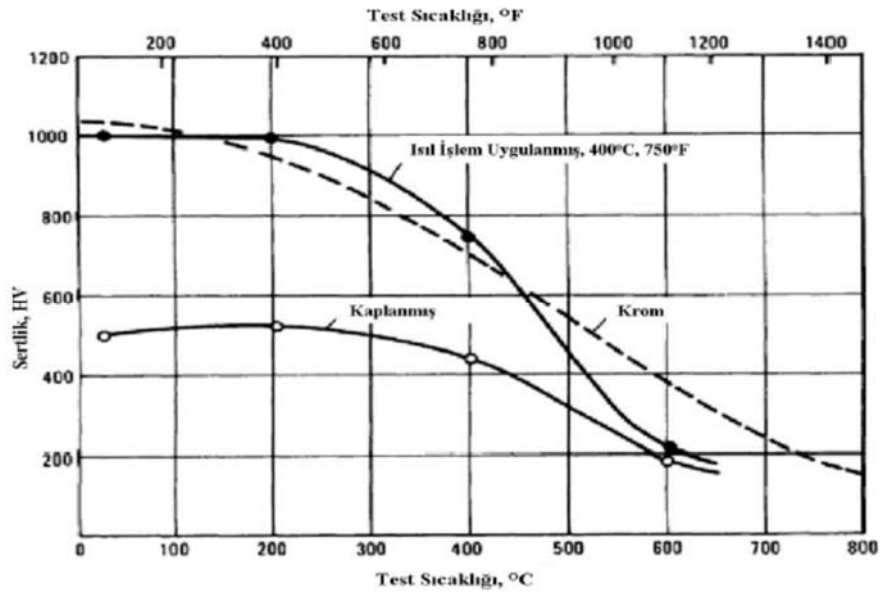
Komponent	Fonksiyon
Nikel İyonu	Metal kaynağıdır
İndirgen Madde	Elektron kaynağıdır
Kompleks yapıcı	Banyo stabilizasyonu sağlar
Hızlandırıcılar	İndirgen maddeyi aktifler
Tamponlayıcı madde	Uzun dönem pH kontrolü yapar
pH düzenleyici	Kısa dönem pH kontrolü yapar
Sabitleyici	Çözeltinin Bozulmasını sağlar

Nikel kaplama, nikel iyonlarının sodyum hipofosfit ile katalitik olarak indirgenmesi ile yapılır. Sulu çözeltilerde hipofosfit iyonlarının yavaş elektrokimyasal oksidasyonu nedeniyle, normal banyo koşullarında nikel iyonlarında azalma olmasa da nikel iyonları katalitik yüzeyde indirgenir. Böylece yüzeyde ilk nikel tabakası görülmeye başlandığında nikel tabakası artık bir katalizör görevi görmeye başlar ve kaplama yardımsız bir şekilde yayılır. Bu özellik sayesinde karmaşık geometrilerde hatta iç yüzeylerde bile uniform

kaplamalar elde edilmiş olur. Akımsız nikel kaplamalarının birçok farklı alaşımı bulunmaktadır ve en yaygın olanı ise nikel-fosfor kaplamalardır. Bu kaplamalar bir asitten veya bir alkali çözeltiden yapılabilir. Asit solüsyonlar ise alkali kaplamaları göre daha yaygındır çünkü daha kaliteli yüzeyler ve daha stabil banyolar elde edilebilmektedir (Eriksson, 2014).

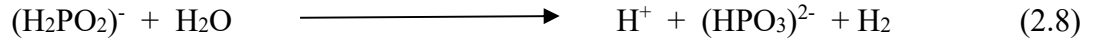
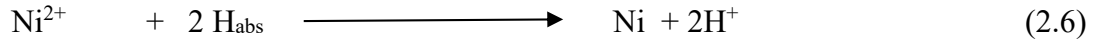
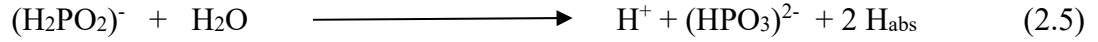
Katalitik reaksiyonlarda dışarıdan harici bir güç kaynağı kullanılmadığından reaksiyonların enerji kaynağı ısı olarak düşünülebilir en etkin kaplama proses sıcaklığı ise 85-95 C° olarak kabul edilmektedir. Kompleks yapıcılar genelde serbest nikel miktarını ayarlayan organik asitler tuzlarından oluşmakta olup nikel banyosunun kendi kendine ayrışmasının önüne geçerek reaksiyonun sadece katalitik yüzeyde oluşmasını sağlar. (Atabay, 2011)

Akımsız nikel kaplamalarda uygulamalardan elde edilen sertlik değerleri 500-600 HV civarındadır. Bu değerler pek çok çeliğe ısıtılma işlemi uygulamasından sonra görülebilecek sertlik değerleridir. Sert krom kaplamaların en avantajlı özelliği sertlik olsa da akımsız nikel kaplamalarda da ısıtılma işlemi gördükten sonra sert krom kaplamalarda olduğu gibi 1000 HV civarında sertliklere ulaşılabilir. İçeriğinde %10 fosfor içeren bir kaplamada sıcaklığın sertlik üzerine olan etkisi aşağıdaki Şekil-2.8' de gösterilmiştir (Atabay, 2011).



Şekil 2.8. Akımsız Nikel Kaplamalarda sıcaklık sertlik ilişkisi (Atabay, 2011)

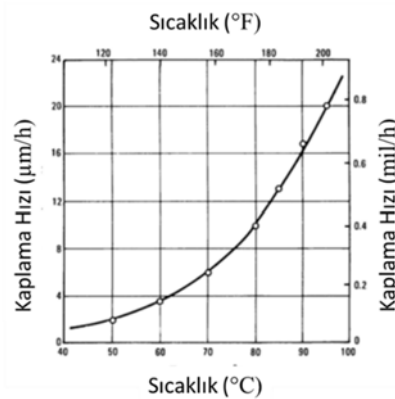
Hipofosfit indirgeyicili akımsız nikel kaplamalar için en yaygın kabul edilen reaksiyonlar;



(Çapkın, 2014)

Çözelti banyosunda yeterli miktarda enerji olması durumunda, burada bahsedilen enerji akımsız nikel kaplama çözeltilerine dışarıdan akım verilmediğinden ısıdır. Hipofosfit iyonları oksitlenerek ortofosfit yapısına geçer, böylelikle reaksiyonda(2.5), görüldüğü gibi kaplanacak malzeme üzerinde hidrojen absorbe edilmiş olur. Reaksiyon(2.6), görüldüğü gibi absorplanmış hidrojen ise çözeltideki nikel iyonunu indirger ve aynı anda reaksiyon(2.7), olduğu gibi hipofosfitin küçük bir miktarını su, fosfor ve OH^- iyonlarına indirger. Reaksiyon(2.8), ile çözeltideki hipofosfitin çoğu ise katalitik ortofosfite yükseltgenerek hidrojen gazı oluşturur. Genellikle çözelti banyosunda kullanılan 5 kg sodyum hipofosfit, 1 kg nikel iyonunu indirgemektedir ve %37 verimlilik sağlanmaktadır (Cotell, Sprague, & Smid, 1994).

Akımsız nikel kaplamalarda, çözeltinin sıcaklığı kaplama hızı ya da diğer deyişle birikim hızını etkileyen en önemli değişkendir değişim grafiği Şekil 2.9' da verilmiştir. Bir kaplama banyosunda sıcaklık, enerji içeriğinin bir ölçüsüdür (Cotell, Sprague, & Smid, 1994).



Şekil 2.9. Çözeltisi Sıcaklığı ve Kaplama Miktarı/Hız İlişkisi (Cotell, Sprague, & Smid, 1994)

2.3. Havacılıkta Sert Krom ve Akımsız Nikel Kaplamalarının Kullanım Yerleri

Havacılıkta sert krom kaplamalar yoğun olarak hidrolik, yağ veya yakıt ile çalışan her türlü akçüatör ünitelerinin, kayarak hareket eden pistonlarında ve iniş takımlarının silindirlerinde kullanılmaktadır.

İniş Takımları; hava araçlarının iniş ve kalkış anlarında kullanılan ve hava aracını yerde iken taksi hareketlerinin yapılmasında destekleyen genellikle tekerlekli bazen de karlı zemine inebilmesi için kızaklı, ya da suya iniş kalkış yapabilmesi için yüzer şekilde tasarlanmışlardır. İniş takımları maksimum kalkış ağırlığının %2-5' ine ve uçağın maliyetinin ise %1.5-1.75' ine tekabül etmektedir. Gövde bakım maliyetinin ise %20' sini iniş takımları oluşturmaktadır. Lastikler, yaklaşık 30 ton yüke ve 300 km/h hıza dayanabilecek şekilde üretilmektedirler (Wikipedia, 2022).

İniş takımlarının maruz kaldığı yükler düşünüldüğünde hava aracının en çok zorlanan kısmı olduğu söylenebilir. Ayrıca iniş takımları iniş anında hava aracına zarar vermeden yumuşak bir iniş yapılabilmesi için süspansiyon özelliklerine sahiptir. Bu durum ana silindirin sürekli aşınma yönünde çalışmasına sebep olmaktadır. Silindir malzemeleri genellikle AISI 4340 yüksek mukavemetli çeliklerinden imal edilmektedir.

Silindir malzemeleri hem aşınma direncini arttırmak hem de korozyon direncini arttırmak için yıllardır sert krom kaplama ile kaplanarak servise verilmektedir. Günümüzde ise Amerika ve Avrupa da bu kaplama HVOF kaplama ile değiştirilse de birçok ülkede geleneksel sert krom kaplama işlemleri devam etmektedir.

Silindirler; hava araçlarında özellikler uçuş kontrol üniteleri ve diğer hareketli yüzeylerin hareketini sağlayan üniteler; gövde üzerinde hidrolik silindirler(akçüatör) motor üzerinde ise yağ veya yakıt ile çalışan silindirlerdir.

Bu üniteler, hava aracının uçarken uçuş kontrol yüzeylerinin hareketlerini, iniş takımlarının açılıp kapanmasını, motor egzozunun açılıp kapanmasını, motora giren havanın ayarlanmasını gibi lineer hareket istenilen her bölgede kullanılmaktadırlar. Bu işlemleri

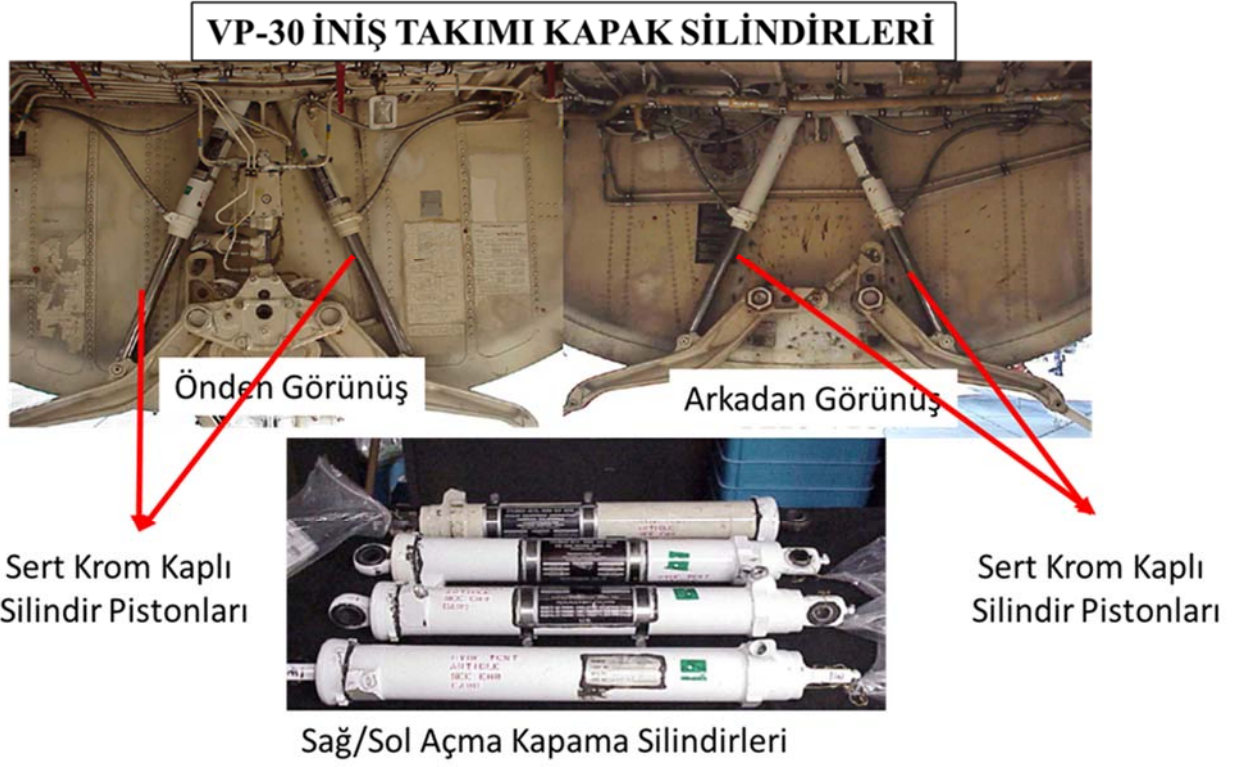
yaparken doğrusal hareket dolayısıyla sürtünme kaynaklı aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple bu silindirlerin pistonları seçilirken AISI 4340, AISI 4310 gibi yüksek mukavemetli çelikler kullanılırken AISI 1020, AISI 301, AISI 321, AISI 316 gibi çelik malzemelerde hidrolik valf grupları, pompa vb. ana ünitelerin içindeki parçalarda sıkça kullanılmaktadır. Hangi malzeme kullanılırsa kullanılsın mutlaka bir yüzey işleme yöntemi ile malzemeler zorlu çalışma koşullarına karşı desteklenmektedir. Genellikle aşınma direnci öncelikli olduğundan sert krom kaplamalar kullanılmaktadır. Motor parçaları gibi yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde ise akımsız nikel kaplamaların tercih edildiği bilinmektedir. Günümüzde silindir pistonlarının da aynı iniş takımlarında olduğu gibi sert krom kaplamaları HVOF kaplama ile değiştirilmektedir.

Aşağıdaki görsellerde internet açık kaynaklarda sunulan Amerikan Deniz Kuvvetlerine ait uçaklarda sert krom kaplamaların HVOF ile değişimi hakkında raporlardan sert krom kaplı ünitelere ait üniteler verilmiştir.

VP-30 uçağı iniş takımları Şekil-2.10’ da, VP-30 uçağının iniş takımları açma kapatma pistonlarının hidrolik akçüatör pistonları Şekil 2.11’ de ve F-18 uçaklarının uçuş yönlendirmesini yapan uçuş kontrol ünitelerine ait pistonlar Şekil-2.12’de verilmiştir. (Devereaux, 2004)



Şekil 2.10. İniş Takımlarında Sert Krom Kaplı Kısımlar (Devereaux, 2004)



Şekil 2.11. VP-30 İniş Takım Kapakları Silindirleri (Devereaux, 2004)



Şekil 2.12. Çeşitli Sert Krom Kaplı Hidrolik Silindir Pistonları (Devereaux, 2004)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sert krom kaplama ve akımsız nikel kaplamaların performanslarının karşılaştırılması için havacılıkta yaygın kullanılan beş farklı çelik türü tespit edilmiştir. Kavramsal bölümde ve literatür araştırmalarında belirtilen normlara göre beş farklı çelik türünden kupon malzemeler üretilmiştir. Farklı parametrelere göre kuponlar üzerinde inceleme ve deney ortamları kurularak çalışma yapılmıştır. Sürdürülen tüm çalışmalar 1' inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü tesislerinde yapılmış olup aşınma testleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Triboloji Laboratuvarında yürütülmüştür. Bu çalışmada sürdürülen iş akışı aşağıdaki sıralama ve algoritmayla yapılmıştır.

- A. Seçilen farklı özellikteki çeliklerin kuponlarının üretilmiştir.
- B. Elde edilen kuponların yarısına sert krom diğer yarısına ise akımsız nikel kaplamanın yapılmıştır.
- C. Kaplama yapılmış kuponlara;
 - a. Yapışma görünüş incelemesi,
 - b. Sertlik ve kalınlık ölçümleri,
 - c. Bükme testleri,
 - d. Korozyon testi yapılmıştır.
- D. Akımsız nikel kaplanmış kuponlara ısıtılma işlem uygulanması
- E. İki farklı malzeme grubundan elde edilen akımsız nikel, sert krom ve ısıtılma işlem görmüş akımsız nikel kuponlarından diğer testlerden en iyi sonuçları gösteren gruba aşınma testleri uygulanmıştır.

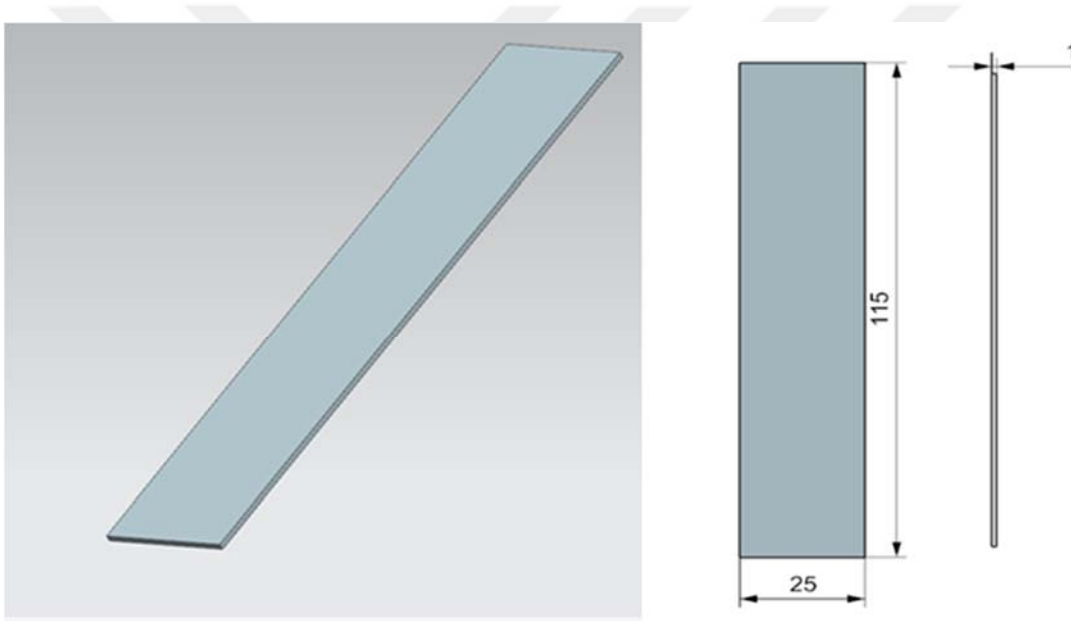
3.1. Araştırma Yöntemi

Test kuponları üretilirken sert krom kaplamalar için QQ-C-320B, AMS-2406-N standartları kullanılmıştır. Akımsız nikel kaplamalar için SAE-AMS-QQ-N-90 standardı kullanılmıştır. Ayrıca her iki kaplama uygulamasının ortak referansı olan USAF tarafından fabrika seviyesi bakım işlemlerinde kullanılan USAF T.O. 42C2-1-7 teknik dokümanlarına göre işlemler yapılmıştır.

Test kupon ölçüleri, standartlardaki ölçülere göre hazırlanmıştır. Aynı standartlara göre kaplama işlemleri yürütülmüş ve yine aynı dökümanlara göre kalite kabul testleri yapılmıştır.

3.2. Evren ve Örneklem/Çalışma Grubu

Sert krom kaplama ve akımsız nikel kaplamaların tribolojik performans karşılaştırılmaları yapılabilmesi için test kuponları hazırlanırken standartlara göre 25mm x 115mm x 1mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Test kuponu ölçüleri Şekil-3.1’ deki gibidir.



Şekil 3.1. Test Kuponu İmalatı için oluşturulan 3D Model

3.2.1. Örnek ham malzemelerin seçilmesi

Tez çalışmasında kullanılacak malzeme seçilirken USAF tarafından halka açık gizlilik derecesinde hazırlanmış olan raporlarda sunulan VP-30, F/A-18 gibi uçakların iniş takımlarında ve özellikle hidrolik ünitelerinde sert krom ve nikel kaplı malzemelerin ana malzemeleri esas alınmıştır. Ana malzemeler artık ve hurda malzemelerden seçilmiş ve aynı zamanda kaplama banyolarının kalite kontrolü eşzamanlı yapılarak malzeme veya kaynak israfı yapılmamıştır. Malzeme seçilirken olabildiğince farklı malzeme gruplarının

araştırmayı çeşitlendirmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple, AISI 4130, AISI 301, AISI 1020, AISI 321 VE AISI 4340 çeliklerinden incelemelere kısıt olmayacak kadar fazla sayıda numune hazır edilmiştir. AISI 4130, AISI 301, AISI 1020, AISI 321 malzemelerinin her birinden 20 adet kupon, AISI 4340 malzemesinden sac bulunamadığından levha malzemedenden ancak 4 adet numune elde edilebilmiştir.

Çelikler: Dikkate değer oranlarda farklı alaşımlarda içerebilen demir-karbon alaşımlarıdır. Farklı bileşimlere ve ısıtma işleme sahip binlerce farklı alaşım bulunmaktadır. Mekanik özellikleri karbon içeriğine duyarlıdır, normalde karbon oranı ağırlıkça %1' den azdır. Çoğunluklar karbon oranlarına göre düşük karbonlu, orta ve yüksek karbon oranlı çelikler olarak sınıflandırılmaktadırlar (William D. Callister, 2014).

Düşük Karbonlu Çelikler: Farklı çelik grupları arasında en çok üretimi yapılanlar bu gruba girmektedirler. Bu gruptaki çeliklerin içerdiği karbon oranı %0,25' den azdır ve martenzit oluşturmaya yönelik ısıtma işlemlere tepki vermezler bu sebeple güçlendirme işlemleri soğuk işlemlerle yapılabilir. Mikro-yapıları ferrit ve perlit bileşenlerinden oluşur. Bu çelik grubundaki alaşımlar nispeten yumuşak ve zayıftır ancak olağanüstü süneklik ve tokluğa sahiptir. Ayrıca kaynak edilebilir ve işlenebilirler tüm gruplar içerisinde en düşük üretim maliyeti olan gruptur. Tipik olarak 275 MPa (40000 psi) akma dayanımına, 415-550 MPa (60000-80000 psi) çekme dayanımına sahiptirler (William D. Callister, 2014).

Orta Karbonlu Çelikler: Karbon oranı %0,25-0,60 arasına giren çeliklerin grubudur. Bu alaşımlar, mekanik özelliklerini iyileştirmek için östenitleme, su verme ve ardından temperleme yoluyla ısıtma işleme tabi tutulabilir. Sadece orta karbonlu çelikler düşük sertleştirilebilirliğe sahiptir sadece çok ince kesitlerde çok hızlı su verme yoluyla başarılı bir ısıtma işleme tabi tutulabilirler. Alaşıma krom, nikel ve molibden ilaveleri bu alaşımların ısıtma işlemi görme kapasitelerini geliştirmektedir ve buda çeşitli mukavemet-süneklik kombinasyonlu alaşımların ortaya çıkmasına olanak sağlar (William D. Callister, 2014).

Yüksek Karbonlu Çelikler: Karbon oranı %0,60-1,40 arasında olan bu malzemeler karbon çelikleri içerisinde en sert, en güçlü ancak en az sünek olanıdır. Neredeyse her zaman sertleştirilmiş ve temperlenmiş olarak kullanılırlar ve özellikle aşınma dirençleri çok yüksektir (William D. Callister, 2014).

Paslanmaz Çelikler: Paslanmaz çelikler çeşitli ortamlarda özellikle dış ortamda atmosfer ile etkileşim halinde paslanmaya karşı oldukça dirençlidirler. Bu çeliklerin baskın alaşım elementi kromdur. Ağırlıkça en az %11 krom elementi içermesi bir alaşımın paslanmaz çelik olarak tanımlanması için yeterlidir. Korozyon direnci nikel ve molibden eklenerek de arttırabilmektedir.

Paslanmaz çelikler mikro-yapılarındaki baskın faz bileşenine göre; martenzitik, ferritik veya östenitik olarak üç sınıfa ayrılmaktadırlar (William D. Callister, 2014).

Çalışmamızda kullanılan ana malzemeler hakkında bilgiler;

AISI 1020 Çeliği: düşük karbonlu çelikler sınıfında bulunan bu malzemenin bileşenleri %0,17-0,23 karbon, % 0,30-0,60 mangan, % 0,035 fosfor, %0,040 kükürt, % 0,15-0,40 silisyum şeklindedir (Handbook Committee, 1990).

AISI 301 Çeliği: östenitik paslanmaz çelik grubunda bulunan bu malzeme manyetik değildir, kaynak edilebilir, şekillendirilebilir. bu malzemenin bileşenleri; %0.08 karbon, %0,4 azot, %16,6 krom, %6,8 nikel, %0,2 molibden, %1 mangan, %0,45 silisyum şeklindedir (Mcguire, 2008).

AISI 4130 Çeliği: orta karbonlu çeliklerin yüksek mukavemetli çelikler grubundadır. bu malzemenin bileşenleri; %0,28-0,33 karbon, %0,20-0,35 silisyum, %0,40-0,60 mangan, %0,8-1,10 krom, %0,15-0,25 molibden şeklindedir (Handbook Committee, 1990).

AISI 4340 Çeliği: orta karbonlu çeliklerin yüksek mukavemetli çelikler grubundadır. bu malzemenin bileşenleri; %0,38-0,43 karbon, %0,20-0,35 silisyum, %0,60-0,80 mangan, %1,65-2 nikel, %0,7-0,9 krom, %0,2-0,3 molibden şeklindedir (Handbook Committee, 1990).

AISI 321 Çeliği: östenitik paslanmaz çelik grubunda bulunan bu malzeme manyetik değildir, kaynak edilebilir, şekillendirilebilir. bu malzemenin bileşenleri; %0,03 karbon, %1 silisyum, %2 mangan, %8-12 nikel, %18-20 krom, %0.045 fosfor, 0.03 kükürt ve % karbon miktarının 5 katı kadar Ti vardır. (Handbook Committee, 1990). Örneklem malzemelerine ait malzemelerin özellikleri Çizelge-3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hazırlanan test kupon malzemelerinin özellikleri (MatWeb, 2022)

Malzeme Sınıfı	Karbon Oranı(%)	Yoğunluk (g/cc)	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
AISI 1020	0.17-0.23	7.87	126	350	420	186
AISI 301	<= 0.15	8.03	217	205	515	212
AISI 4130	0.28-0.33	7.85	207	435	670	205
AISI 4340	0.37-0.43	7.85	387	862	1282	200
AISI 321	<= 0.08	8	147	240	620	200

3.2.2. Test parçalarının üretim yönteminin seçilmesi

Test parçaları üzerinde tribolojik inceleme ve performans karşılaştırılması yapılabilmesi için öncelikle aynı ölçülerde sac malzemeden 25x115x1 mm ölçülerinde kuponlar kestirilmiştir. Beş farklı çelik türünden test kuponları hazırlanmıştır. Bu kapsamda AISI 4340 çeliği haricinde diğer 4 çelik grubundan 20’ şer tane kupon olmak üzere toplam 80 adet test kuponu oluşturulmuştur. AISI 4340 malzemesinden ise sac malzeme temin edilemediğinden levhadan toplam 4 adet numune kesilmiş, böylelikle toplam 84 adet test kuponu elde edilmiştir. Test kuponlarından 42 adedi sert krom kalan 42 adedi ise akımsız nikel kaplanmıştır.

3.2.2.1. Sert Krom Kaplamalar

Sert Krom kaplama işlemleri 1' inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğünde SAE-AMS-2406-N standardı, eski standart QQ-C-320B ve USAF TO 42C2-1-7 Yüzey işleme dökümanları referans alınarak standartlara uygun bir şekilde tamamlanmıştır. Kaplama, iş sırası ve akışında büyük farklar olmamakla birlikte farklı özelliklerdeki malzemelere standartlar gereği farklı işlemler uygulandığı durumlar olmaktadır. Çalışmamızda 5 farklı çelik türü üzerinden işlemlerimizi yürüttüğümüzden düşük alaşımlı çelikler için farklı, yüksek mukavemetli çelikler sınıfına giren AISI 4340 ve AISI 4130 malzemelerine, ön kaplama, kaplama sonrası gerilim giderme tavlaması gibi bir takım farklı iş basamakları uygulanmıştır. Bu adımlar iş adımlarının açıklandığı sonraki safhalarda daha detaylı olarak anlatılmıştır.

Sert krom kaplamalarda standartlara göre iki tür kaplama mevcuttur;

- ❖ **Sınıf 1:** Korozyon önleyici kaplama kaplama kalınlığı en az 0,00001 inç (0,25 µm) olmalıdır.
- ❖ **Sınıf 2:** Mühendislik kaplaması kaplama kalınlığı en az 0,002 inç (51 µm) en fazla 0,015 inç (380 µm) olmalıdır.

Yüzey olarak ise aynı şekilde iki tip mevcuttur;

- ❖ **Tip 1:** Parlak Yüzey
- ❖ **Tip 2:** Saten Yüzey (SAE, 2015)

İş akışı olarak onarım işlemi görece malzemelerde öncelikle eski krom kaplama kimyasal veya mekanik yöntemlerle (taşlama vb.) sökülür. Makinalama işlemi görmüş malzemelere fırında gerilim giderme tavlaması işlemi ve kaplamanın daha iyi yapışması için bazı durumlarda shot-peen işlemleri uygulanmaktadır.

Çalışmamıza özel olan test kuponları bu kapsama girmediğinden yukarı da belirtilen iki iş adımı gerek görülmemiştir. İşlemler temizleme ile başlamıştır 1. temizleme adımı yağ alma işlemidir, test kuponları bir askı teline bağlanarak solvent buharına 3 metre/dk hızla

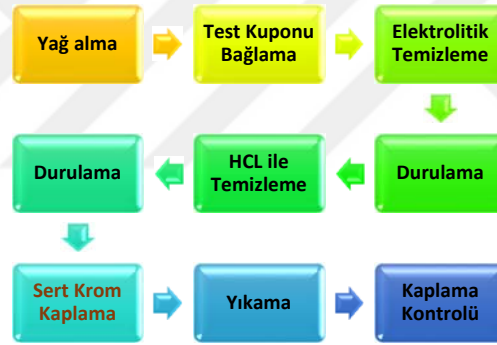
indirilerek seviyesi sabitlenir. Solvent buharı soğuk parça üzerinde yoğunlaşır, yağ ve kirleri içine alarak akar. Parça solvent buharı ile aynı sıcaklığa gelinceye (yoğuşma duruncaya) kadar bekletilir. Parça yine aynı hızla çıkarılır, parça üzerinde kalan solvent buharlaşarak kuruyuncaya kadar bekletilir. Parça üzerinde gres, yağ ve kirlerin olmadığı gözle kontrol edilir. Bu adımdan sonra test kuponunun bağlama işlemi elektriksel iletkenliği sağlanarak, içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde bir aparat veya askı teliyle bağlanır. Malzemenin tüm yüzeyleri kaplanmayacaksa maskeleme işlemi özel bir vaks ile kaplama istenmeyen bölgeler üzerine yapılır. Temizleme 2. adımı ise elektrolitik temizlemedir bu işlemle test kuponu, 52-57 °C derece çözelti içinde 3-6 volta, 3 dakika süreyle anodik olarak temizlenmiştir. Temizleme 3. adım ise hidroklorik asit ile temizleme, HCl çözeltisi (hacimce %50) içerisinde oda sıcaklığında test kuponları 2 dakika tutularak işlem adım tamamlanmıştır. Temizlemenin son adımı durulama işlemidir saf suda ve oda sıcaklığında bir dakika süreyle temizlemede temizleyici malzeme atıklarından herhangi birisi kalmaması için bu işlem yapılmaktadır. Temizleme işleminden sonra test kuponlarının iyice temizlendiğinden emin olmak için su kırılma testi yapılmaktadır bu test malzemenin üzerine fiskiye ile su tutularak malzeme yüzeyinden suyun hiç kırılmadan süzülmesini içermektedir. Bu testin olumsuz olduğu durumlarda temizleme işlemi yeniden uygulanmaktadır.

Su kırılma testi: Bir yüzey üzerinde süreksiz bir su filminin görünümü, üniform olmayan ıslanma anlamına gelir ve genellikle bir yüzey kirliliği ile ilişkilendirilir. (Figert, 2020)

Temizlenen test kuponları sert krom kaplama çözeltisine daldırılır ve solüsyon sıcaklığına kadar ısınması beklenir, ilk 5 dakika içerisinde toplam akımın 1/3' ü verilir. İkinci 5 dakika içinde toplam akımın 2/3' ü verilir daha sonra toplam akımın tümü verilerek test kuponları sert akım kaplama çözeltisinde 23,3-77,5 A/dm²' de istenilen kalınlık elde edilinceye kadar sert krom kaplanır. Kaplama esnasında parça ara sıra suyla durularak ölçü kontrolü yapılır istenilen kalınlık elde edilinceye kadar kaplama işlemine devam edilir. Kaplama sonrası temizleme işleminde parça 15-300 saniye 25-82 °C sıcaklığı arasında su ile yıkanır. Maske var ise maske söküm işlemi yapılır. Kaplama gözle kontrol edilerek yüzeyde tabakalaşma, tomurcuklanma, çukurlaşma, çatlama ve köşelerde birikme yönüyle incelenir.

Çalışmamızda, AISI 4340 ve AISI 4130 malzemeleri iniş takımlarında kullanılan ve yüksek mukavemetli çelikler sınıfına girdiğinden ayrı bir prosese göre işlem görmüştür iş adımları büyük ölçüde yukarıda sırasıyla tanımlanan adımlar ile aynı olmakla birlikte kaplama öncesinde bu malzemelere shot-peen uygulanmadığı durumlarda temizleme adımlarında sonra ayrıca kumlama ile mekanik temizleme yapılmıştır. Kumlama ile yapılan mekanik temizleme sonrasında malzeme üzerinde kumlama malzemesi kalmaması için ise asitle dağlama işleminde parçalar kromik asit aktifleştirme çözeltisi içerisinde $15-47 \text{ A/dm}^2$ de 30-60 saniye bekletilmiştir.

Fırınlama işlemi, sertliği 40 HRC veya üzerinde olan çelikler, en geç 4 saat içinde hidrojen gazı giderilmesi amacıyla fırınlanır. Çalışmamızda üretilen test kuponlarından AISI 4340 ve AISI 4130 malzemelerine fırınlama işlemi 375° F (191°C)’ de 1,5 saat gerilim giderme tavlaması yapılmıştır. Proses akışları Şekil-3.2 ve Şekil-3.3’ te verildiği gibidir.



Şekil 3.2. Düşük Alaşımli çeliklere uygulanan İşlem Adımları



Şekil 3.3 Yüksek Mukavemetli Çeliklere Uygulanan İşlem Adımları

Sert krom kaplama işlemlerinin görselleri iş istasyonu üzerinde sırasıyla Şekil-3.4’ den Şekil-3.6’ ya kadar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.4. Sert Krom Kaplama Hattı (1 HBFM)



Şekil 3.5. Elektrolitik Temizleme(Sol), Hidroklorik Asit ile Temizleme (Sağ)



Şekil 3.6. Sert Krom Kaplama İşlemi

3.2.2.2. Akımsız Nikel Kaplamalar

Akımsız nikel kaplama işlemleri 1' inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğünde SAE-AMS-QQ-N-90 standardı ve USAF TO 42C2-1-7 Yüzey işleme dökümanları referans alınarak standartlara uygun bir şekilde tamamlanmıştır. Akımsız nikel kaplamalarda iş sırası ve akışında büyük farklar olmamakla birlikte farklı özelliklerdeki malzemelere farklı işlemler uygulandığı durumlar olmaktadır. Çalışmamızda 5 farklı çelik türü üzerinden işlemlerimizi yürüttüğümüzden yüksek mukavemetli çelikler sınıfına giren AISI 4340 ve AISI 4130 malzemelerine bir takım farklı iş basamakları uygulanmıştır. Bu farklar aşağıda açıklanmıştır.

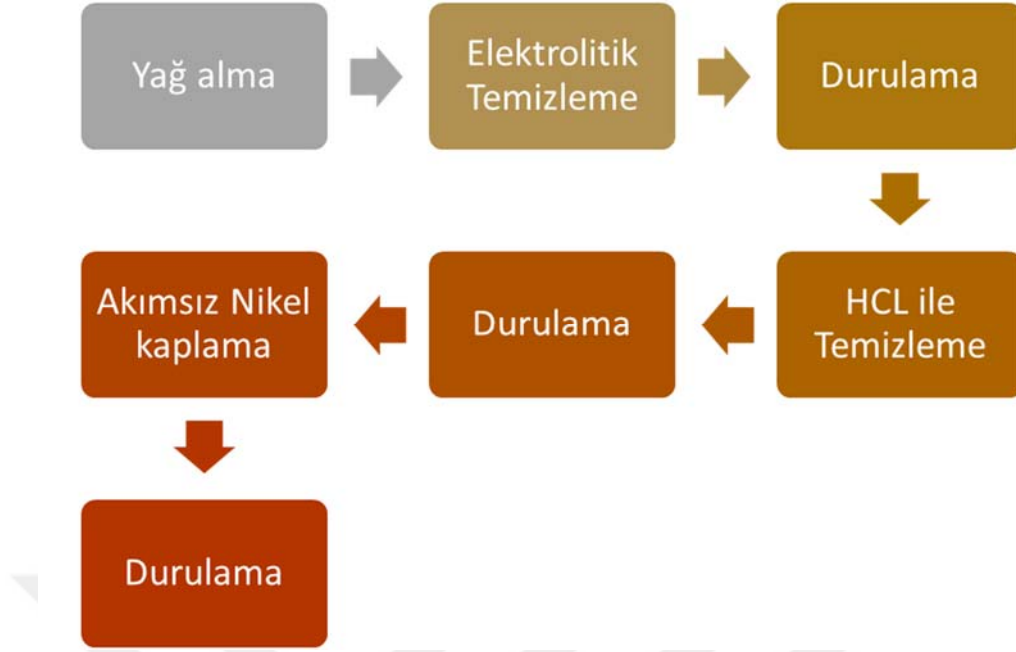
Kaplama iş akışı olarak öncelikle gerilim giderme işlemi uygulanmaktadır ancak bu işlem tamir edilen malzemelerde makinalama ve soğuk şekillendirme görmüş parçalara uygulandığından çalıştığımız test kuponları için bu adıma gerek görülmemiştir. İşlemler Temizleme ile başlamıştır 1. temizleme adımı yağ alma işlemidir, test kuponları bir askı teline bağlanarak solvent buharına 3 metre/dk hızla indirilerek seviyesi sabitlenir. Solvent buharı soğuk parça üzerinde yoğunlaşır, yağ ve kirleri içine alarak akar. Parça solvent buharı ile aynı sıcaklığa gelinceye (yoğuşma duruncaya) kadar bekletilir. Parça yine aynı hızla

çıkarılır, parça üzerince kalan solvent buharlaşarak kuruyuncaya bekletilir. Parça üzerinde gres, yağ ve kirlerin olmadığı gözle kontrol edilir. Bu adımdan sonra maskeleme ihtiyacı var ise özel bir vaks ile kaplama istenmeyen bölgeler kaplanmaktadır. Temizleme 2. Adımı ise elektrolitik temizlemedir bu işlemle test kuponu, 52-57 °C derece çözelti içinde 3-6 voltta, 3 dakika süreyle Anodik olarak temizlenmiştir. Temizleme 3. adım ise hidroklorik asit ile temizleme, HCL çözeltisi (hacimce %50) içerisinde oda sıcaklığında test kuponları 2 dakika tutularak işlem adım tamamlanmıştır. Temizlemenin son adımı durulama işlemidir saf suda ve oda sıcaklığında bir dakika süreyle temizlemede temizleyici malzeme atıklarından herhangi birisi kalmaması için bu işlem yapılmaktadır. Temizleme işleminden sonra test kuponlarının iyice temizlendiğinden emin olmak için su kırılma testi yapılmaktadır bu test malzemenin üzerine fiskiye ile su tutularak malzeme yüzeyinden suyun hiç kırılmadan süzülmesini içermektedir.

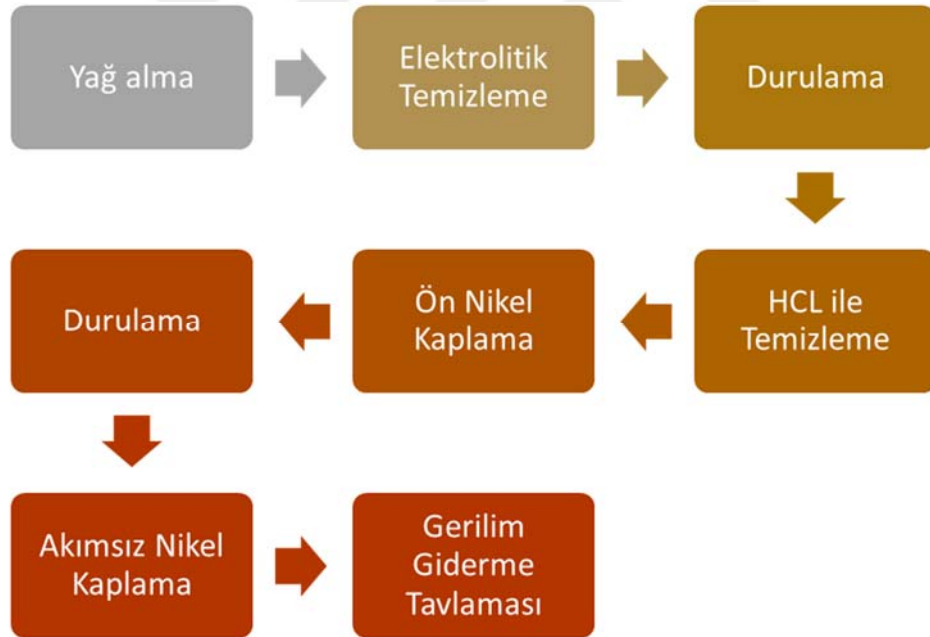
Temizlenen test kuponu akımsız nikel kaplama çözeltisine atılarak 77-80 derece sıcaklıkta kaplama yapılmış ve kaplama sonrası temizleme ve sonrasında fırınlama işlemi yapılarak süreç tamamlanmıştır.

Fırınlama işlemi, alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklere uygulanmaz ancak yüksek mukavemetli çeliklere, çalışma yapılan AISI 4340 ve AISI 4130 malzemelerine fırınlama işlemi 375° F (191°C)' de 1.5 saat gerilim giderme tavlama yapılır.

Çalışmamızda, AISI 4340 ve AISI 4130 malzemeleri ise hidroklorikasitle temizleme sonrasında ön nikel kaplamaya tabi tutulur daha sonra su ile durulaması yapılır ve esas akımsız nikel çözeltisinde kaplandıktan sonra diğer malzemelerden farklı olarak 343 °C' da 1.5 saat süreyle gerilim giderme için fırınlama işlemi yapılmaktadır. Proses akış planı ve uygulanan işlemlerin görselleri şekil-3.7' den şekil-3.13' e kadar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.7. Alaşımsız ve düşük alaşımlı Çeliklere Uygulanan Prosesler



Şekil 3.8. AISI 4340 ve 4140 Çeliklerine Uygulanan Prosesler



Şekil 3.9. Akımsız Nikel Kaplama Hattı (1HBFM)



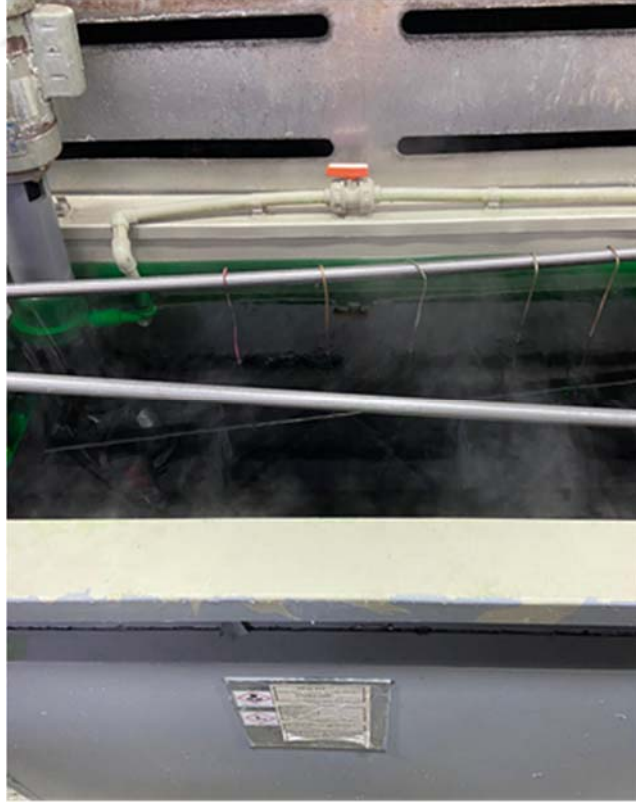
Şekil 3.10. Elektrolitik Temizleme İşlemi



Şekil 3.11. Hidroklorik Asit ile Temizleme İşlemi



Şekil 3.12. Durulama İşlemi

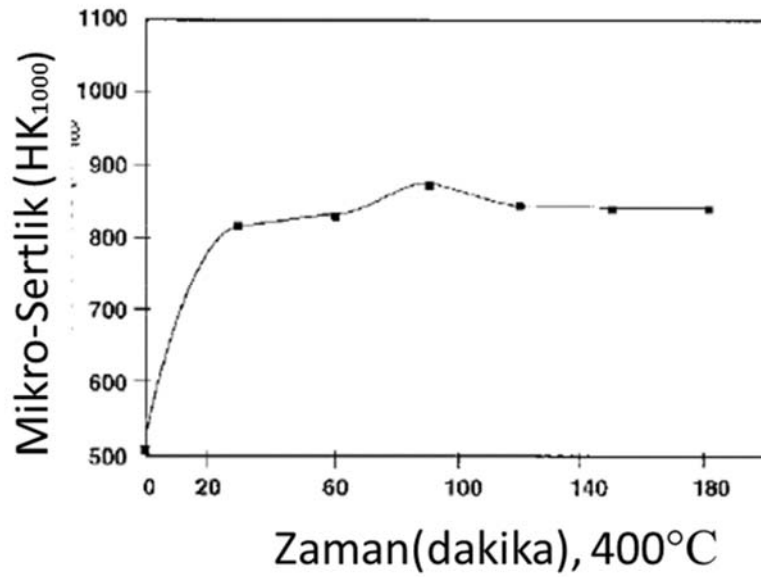


Şekil 3.13. Akımsız Nikel Kaplama İşlemi

3.2.2.3. Isıl İşlem

Test kuponlarına kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra karşılaştırma yapılırken sert krom kaplamaların, akımsız nikel kaplamalara göre hem sertlik hem de aşınma direnci yönüyle daha iyi sonuçlar vereceği zaten bilinmekte olduğundan akımsız nikel kaplamalar üzerinde iyileştirme yapılarak alınan sonuçlarında değerlendirmeye katılması amaçlanmıştır.

Akımlı nikel kaplamalarda ısıl işlem, yeniden kristallenme ve tane büyümesi sebebiyle ciddi şekilde sertlik düşmesine sebep olsa da bu durum akımsız nikelde tam tersidir. Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlem sert krom kaplamalara benzer ciddi sertlik artışlarına sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı sert ve yüksek aşınma direnci özellikleri istenilen kaplama uygulamalarında sert krom kaplamalar akımsız nikel kaplamalar ile değiştirilmektedir. Akımsız nikel kaplamalarda sertlik ve ısıl işlem ilişkini gösteren grafik şekil-3.14’ de verilmiştir (Parkinson, 2001).



Şekil 3.14. Isıl işlemde Sertlik ve Süre İlişkisi (Parkinson, 2001)

Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlem sertliği arttırmasına rağmen ısıl işlemin olumsuz bir özelliği ise kaplamanın korozyon direncini düşürmesidir. Bu sebeple ısıl işlem uygulanırken kayıp-kazanç oranının belirlenmesi önemlidir. Akımsız nikel kaplamalar iyi bir aşınma direncine sahiptir. Çünkü normal sertlikleri yüksektir ve doğal yağlama

özellikleri vardır. Eğer istenirse, bu özellikleri ısıtım işlem uygulamaları ile daha da iyileştirilebilir. Maksimum sertlik elde edebilmek için önerilen 3 tip ısıtım işlem uygulaması vardır. Bu yöntemler aşağıdaki Çizelge-3.2' de verilmiştir (Parkinson, 2001).

Çizelge 3.2. Maksimum Sertlik için Önerilen Isıtım İşlem Uygulamaları (Parkinson, 2001)

Fosfor Oranı (%)	Isıtım İşlem
2-5	400°-425° C' de 1 saat
6-9	375°-400° C' de 1 saat
10-13	375°-400° C' de 1 saat

Uygun bir ısıtım işlem sonucu akımsız nikel kaplama sertliği 1300 HV değerine arttırabilir, Ni-P kaplamaların optimum ısıtım işlem sıcaklığı 300 °C -400 °C aralığında olmakla birlikte maksimum sertliğe ulaşmak için ısıtım işlemin 400°C sıcaklıkta 1 saat olarak yapılması önerilmektedir (Buchтік, Krystýnová, & Másilko, 2019).

Bu bilgiler değerlendirilerek test kuponları 400 °C sıcaklık ve 1 saat süre ısıtım işlem uygulanmıştır. Korozyon direncini olumsuz etkilememesi için ısıtım işlem yapılırken vakumlu fırın kullanılmıştır. Kullanılan Abar Ipsen HR 34 x 40 markalı vakum fırınının görseli Şekil-3.15' de verilmiştir.



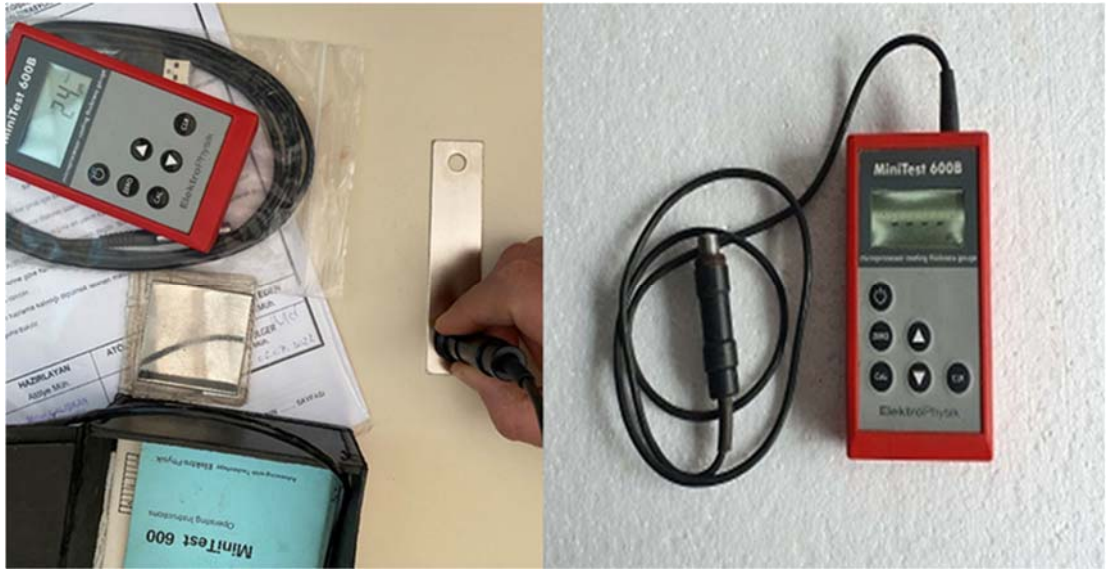
Şekil 3.15. Abar Ipsen HR 34 Vakum Fırını (üstte), Isıtım İşlem Gören Test Kuponları(altta)

3.3. Veri Toplama Araçları

Sert krom ve akımsız nikel kaplama ile kaplanan numuneler incelenirken birçok farklı değerlendirme kriterine göre incelendiğinden çeşitli özel cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu cihazlar mikro ve makro kalınlık ölçme cihazları; hem atölye ortamında hem de metalürjik laboratuvarında inceleme yapılırken kullanılmaktadırlar. Optik mikroskoplar; kaplamaların ana malzemeye nasıl tutunduğunun ve herhangi bir kusur olup olmadığının değerlendirmesinde kullanılmaktadırlar. Sertlik cihazları incelenecek malzemenin sertliğinin ölçüldüğü tahribatlı bir test yapan cihazlardır.

3.3.1. Makro Kalınlık Ölçme Cihazları

Atölye ortamında pratik ölçümler yapılabilmesi için eddy-current prensibiyle çalışan manyetik veya manyetik olmayan malzemelerin kaplama kalınlıklarını ölçebilecek farklı veya universal proplara sahip olan Minitest 600 B ve Paint Test Equipment C5001 kalınlık ölçüm cihazları ile ölçümler yapılarak kaplama kalınlıkları sürekli olarak kontrol altında tutulmuştur.. Cihazların görselleri Şekil-3.16 ve Şekil-3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.16. Minitest 600B Kalınlık Ölçme Cihazı

Minitest 600B kalınlık ölçüm cihazının özellikleri

- ❖ Çeliklerin üzerindeki manyetik olmayan tüm kaplamaları,
- ❖ Prop tipine göre eddy-current ölçüm metodu demir dışı metalleri
- ❖ Manyetik-indüksiyon probu ile demir içeren metalleri
- ❖ Çift özellikli prop ile her iki tür malzemeyi,
- ❖ Demirdışı metaller üzerinde 0-2000 μm kalınlıkları,
- ❖ Demir alaşımlarını 0-3000 μm kalınlıkları,
- ❖ Çiftli ölçümde ise 0-2000 μm kalınlıkları,
- ❖ Dijital ekranda göstererek,
- ❖ %2 ölçüm toleransı ile,
- ❖ Minimum 20 mm² ölçüm alanı ile,
- ❖ Her ölçüm öncesi kullanıcı kalibresi yapılarak ölçebilmektedir. (Checkline, 2022)

Paint Test Equipment Kalınlık Ölçüm Cihazı

- ❖ Çeliklerin üzerindeki manyetik olmayan tüm kaplamaları,
- ❖ Prop tipine göre eddy-current ölçüm metodu demir dışı metalleri
- ❖ Manyetik-indüksiyon probu ile demir içeren metalleri
- ❖ Çift özellikli prop ile her iki tür malzemeyi,
- ❖ Demirdışı metaller üzerinde 0-2000 μm kalınlıkları,
- ❖ Demir alaşımlarını 0-3000 μm kalınlıkları,
- ❖ Çiftli ölçümde ise 0-2000 μm kalınlıkları,
- ❖ Dijital ekranda göstererek,
- ❖ %1-3 ölçüm toleransı ile
- ❖ Her ölçüm öncesi kullanıcı kalibresi yapılarak ölçebilmektedir. (Equipment, 2022)



Şekil 3.17. Paint Test Equipment Kalınlık Ölçüm Cihazı

3.3.2. Sertlik Testi Cihazı

Test kuponları incelenirken Buehler marka mikro sertlik cihazı ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Cihaz periyodik olarak kalibre edilen ve ayarlanabilir farklı yük aralıklarında ölçüm yapabilme kabiliyetine sahiptir.

Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kaplama sertlik ölçümlerinde 100 gr-f yük altında 5 ayrı noktadan ölçümler yaparak ortalama değerlerini almıştır (Yan, Ying, & Ma, 2008). Ericksson ise kendi çalışmasında önce ana metal ve sonrasında kaplama sertlik ölçümlerini 25 gr-f yük altında yapmıştır (Eriksson, 2014).

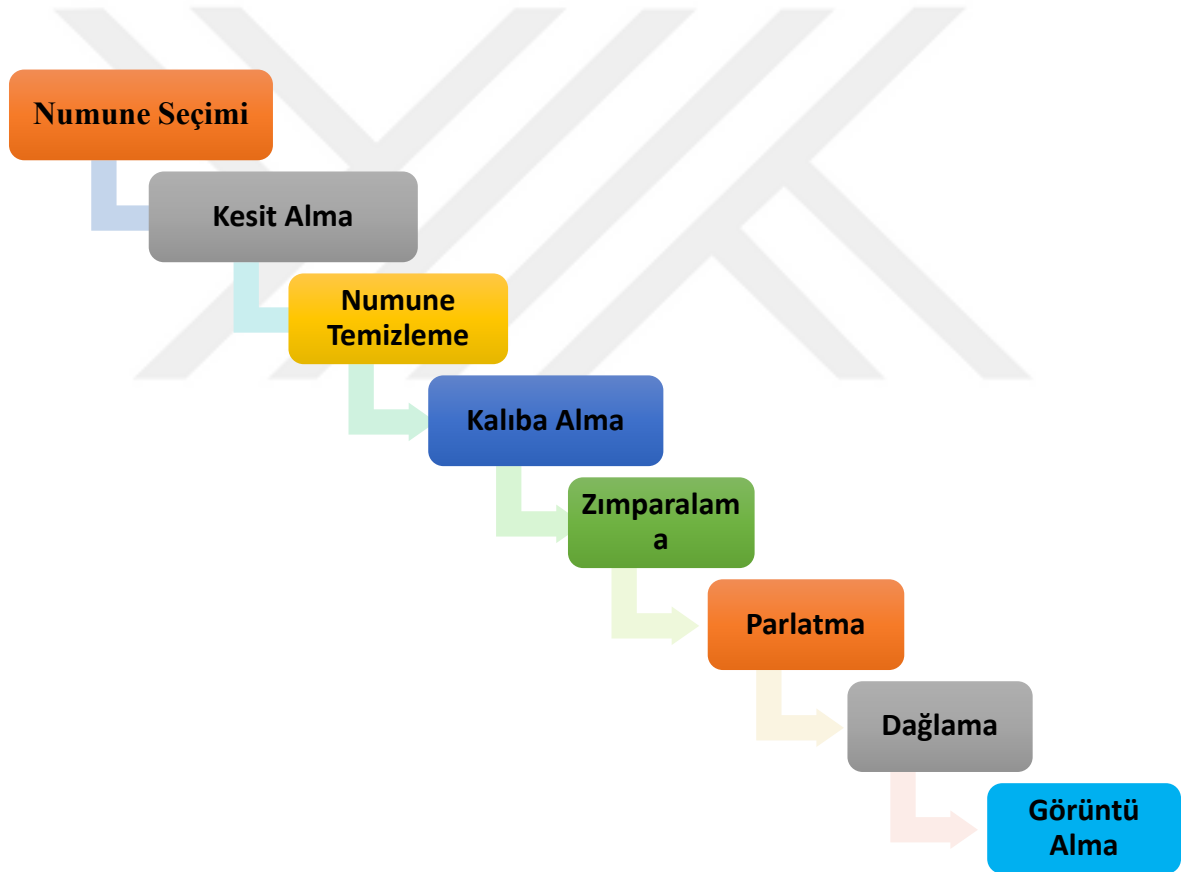
Bu çalışmada ana malzeme ve akımsız nikel, sert krom ve ısıtılmış akımsız kaplama sertlik ölçümleri akımsız 25 gr-f yük altında, her farklı test kuponu için kaplama bölgesinden beş farklı noktadan yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır. Cihazın görseli Şekil-3.18’ de verilmiştir.



Şekil 3.18. Buehler Micro Vickers 38647 Mikro Sertlik ölçme Cihazı

3.3.3. Test Numunesi Hazırlama Cihazları

Metalürjik Laboratuvar testlerinde SEM incelemelerinin yapılabilmesi numune hazırlama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. İncelenecek parça için uygulamada genellikle en kritik yerden veya ana malzemeyi en iyi şekilde temsil edecek bölgeden numune seçimi yapılır. Numuneler mikro yapı incelemesine uygun büyüklükte seçildikten sonra inceleme istenilen yere kesit alınarak numune kesilir, temizlendikten sonra numune sıcak veya soğuk kalıba alınır. Kalıp incelemeyi kolaylaştırması için zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulur ve incelemeye hazır hale getirilir. Numune alma için proses akışı Şekil-3.19’ da verilmiştir.



Şekil 3.19. Metalurjik Laboratuvarı Numune Hazırlama İş Akışı

3.3.3.1. Kesit Alma

Kesit alma işleminde strues secotom 10 cihazı kullanılmıştır. Kesit alınırken hassas elmas kesme diskleri kullanılmaktadır, bu diskler kesilecek malzemenin cinsine göre seçilirler. Kesim işlemi yapılırken sürtünme kaynaklı ısınmanın önüne geçebilmek ve iyi bir yüzey kalitesi elde edebilmek amacıyla soğutma sıvıları kullanılır. Kullanılan cihaz görseli Şekil-3.20’ de verilmiştir. Dönme hızı 2600 rpm, ilerleme hızı 0,025 mm/sn olarak seçilmiştir.



Şekil 3.20. Strues Secotom-10 Kesme Cihazı

3.3.3.2. Kalıba Alma

Numunenin zımparalama ve parlatma işlemleri esnasında numunenin gözenek ve boşluklarına malzeme yığılması sebebiyle mikro yapı incelemesi esnasında yanıltıcı sonuçlar yaratmaması için malzeme sıcak veya soğuk kalıba alınabilir. Sıcak kalıplamada sıcaklık yaklaşık 150°C değerlerine ulaşır. Numunenin kalıba alınmasıyla gözenekli yapıları sentetik reçine ile doldurulduğundan zımpara ve parlatma esnasında kopan parçaların gözenekleri doldurması riskinin önüne geçilmiş olur. Bu çalışmamızda sıcak kalıba alma

yöntemi ve BUEHLER SIMPLIMET 2000 otomatik kalıplama pres cihazı kullanılarak 170 derece sıcaklık, 7.5 dk süreyle yapılmıştır. Cihazın görseli Şekil-3.21’ de verilmiştir

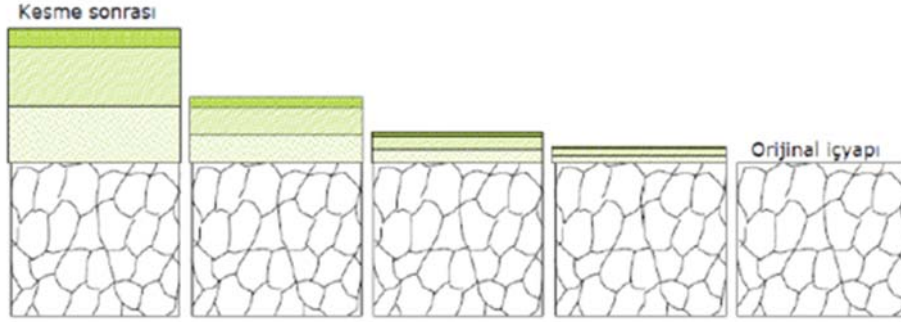


Şekil 3.21. Buehler Simplimet 2000 Otomatik Kalıplama Pres Cihazı

3.3.3.3. Zımparalama

Kesim işlemleri esnasında numune bir takım hasarlar meydana gelir. Bu hasarların giderilmesi için zımparalama ve ardından parlatma işlemi yapılmaktadır. Zımparalama işlemi sonrası malzemenin yüzeyinde kalan tek hasar zımparalama kaynaklı oluşan hasar olmalıdır. Bu tip hasarlar ise parlatma işlemi ile kolaylıkla giderilebilir. Zımparalama aşamasında numunenin yüzeyinin ısınmasının önlenmesi için su kullanılır. Zımparalama işleminden sonra numune ultrasonik temizleme cihazıyla temizlenmelidir. SiC parçacıklarla kaplı aşındırıcı kâğıtlar ile işlem kabadan hassasa doğru seri şekilde uygulanır. Bu çalışmada sırasıyla 500, 600, 800, 1200, 2500 grid aşındırıcı kâğıtlar ile her kademedede 2’ şer dakika

olacak şekilde işlem tamamlanmıştır. Aşağıda bu hasarların giderilme aşamaları Şekil-3.22’ de verilmiştir. (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)



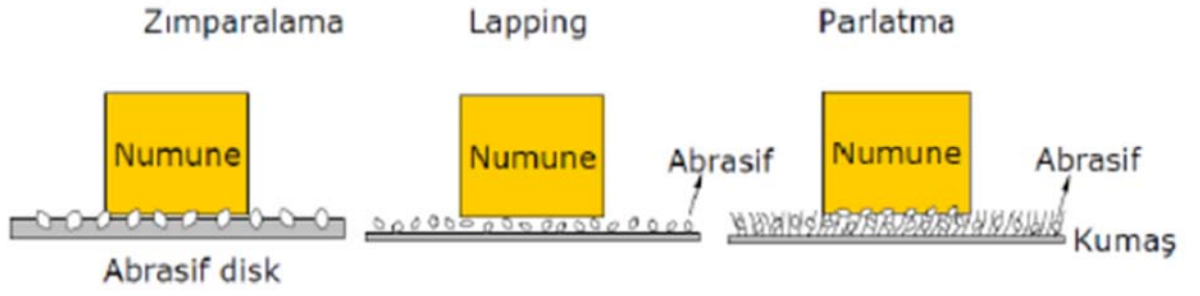
Şekil 3.22. Zımparalama ile Yüzeydeki Hasarın giderilmesi (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)

3.3.3.4. Parlatma

Parlatma işlemi bir önceki iş basamağı olan zımparalama işleminden gelen kusurları gidermek için yapılmaktadır. Bu işlem üç adımda ve seri şekilde yapılmaktadır;

- ❖ **Kaba parlatma;** 30 μm -3 μm arasında elmas pastalar kullanılarak yapılan parlatma işlemidir
- ❖ **İnce Parlatma;** 1 μm ve altında boyutlara sahip elmas pastalar kullanılarak yapılan parlatma işlemidir.
- ❖ **Son parlatma;** 250 nm ile 50 nm arasında elmas pasta, kolloidal silika ya da alümina kullanılarak yapılan parlatma işlemidir.

Parlatma işleminde numune ultrasonik temizleme yapılmış olmalıdır, ince taneli diskler ile zımparalama işleminden sonra numuneler düzgün, çiziksiz ve yüksek yansıtıcı yüzeylere sahip olacak şekilde parlatma işlemine tabi tutulur. Aşağıda numune üzerinde yapılan zımparalama ve parlatma işlem adımları şematik olarak Şekil-3.23’ de gösterilmiştir. (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)



Şekil 3.23. Zımparalama ve Parlatma işlem Adımlarının Gösterimi (Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları, 2022)

Zımparalama ve parlatma işlem adımlarında kullanılan ATA SYSTEM LABOR markalı cihazı kullanılarak 5 mikron alümina toz ile 2 dakika süreyle, 1 mikron alümina toz ile 2 dakika süreyle işlemler tamamlanmıştır. Cihazın görseli Şekil-3.24’ de verilmiştir.



Şekil 3.24. Zımparalama ve Parlatma Cihazı

3.3.3.5. Dağlama

Mikro yapı incelemesinde numune yüzeyi pürüzsüz hale getirilip parlatıldıktan sonra ışığı eşit bir şekilde yansıttığı için detaylar görünür halde değildir. Tane yapıları belirsizdir, tane yapılarını belirli hale getirebilmek için dağlama yapılmaktadır.

Dağlama işlemleri;

- ❖ Kimyasal dağlama,
- ❖ Termal Dağlama,
- ❖ Plazma Dağlama,
- ❖ Elektrolitik dağlama şeklinde dört farklı türde yapılmaktadır.

Bu çalışmada uygulanan dağlama kimyasal dağlamadır. Kimyasal dağlama işleminde asit kullanılarak numunenin mikroyapısı daha belirgin hale getirilir. Çalışmada hidroklorik-asit (HCl) kullanılmıştır.

3.3.3.6. Görüntü Alma

Numune hazırlama safhasının tüm amacı doğru ve etkili bir inceleme yapılabilmesi içindir. Görüntü alma aşamasında kaplamanın ana metalle olan birleşmesi ve kaplamanın kendi içindeki katmanlarının yapışma durumu, ana malzemenin mikro-yapı özelliklerini incelemek ve varsa kusurlarını (boşluk, mikro-çatlaklar, ayrılma veya pullanma vb.) tespit edilmesi için kullanılan iş adıdır. İnceleme işlemleri için kullanılan sistem Nikon Dijital DS-Fi1 ve bir optik mikroskoptan oluşmaktadır. Sistem elde edilen görüntüleri bilgisayara aktararak görseller kullanılmıştır. Sisteme ait görsel Şekil-3.25' te verilmiştir.



Şekil 3.25. Nikon Dijital DS-Fi1 Kamera ve Optik Mikroskop

3.3.4. Korozyon Test Kabini

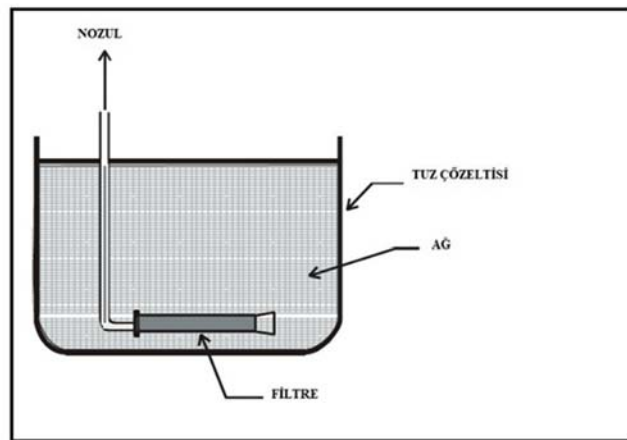
Sert krom ve akımsız nikel kaplamaların en önemli amaçlarından biriside kaplama yapılan ana malzemenin korozyon dirençlerini arttırmaktır. Yapılan kaplamaların korozyon testleri iki şekilde yapılabilmektedir. Tamamen doğal koşullarda ve gerçek zamanlı bekletme testleri ya da koroziv bir ortam oluşturularak hızlandırılmış laboratuvar testleri şeklinde yürütülebilir. Endüstriyel ortamda tercih edilen hızlandırılmış testler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- **Tuz Püskürtme Testleri:** Genellikle tuz sisi oluşturularak yapay atmosferlerde, çevresel koşullara dayanıklılık deneyleri yapmak amacıyla metalik ana malzemelerin üzerine kaplanan metalik veya anorganik kaplamaların test edilmesinde kullanılır.

- **Yoğuşan Nem Testleri:** Neme dayanıklılık tayini için genellikle boya ve vernikleri test etmek amacıyla kullanılmaktadır.
- **Yüksek Rutubetle birlikte kirlilik gazı testleri :** boya vernik veya metalik ve anorganik kaplamaların kükürt dioksitli nemli atmosferlerde testinde kullanılmaktadır.
- **Alternatif Çevrim testleri:** Metallerin ve alaşımlarının, tuz ve sodyum klorür çözeltisine, asitli tuz spreyine, ıslak, kuru, nemli ortamlara tekrarlı çevrim testlerini kapsamaktadır. (Teknolab, 2022)

Bu tez çalışmasında yürütülen korozyon testi çalışması tuz testidir. Tuz sisi testi metallerin üzerine uygulanan kaplamanın bir kalite kontrol testi olarak kaplamaların süreksizliği ve yüzey yapısında bir kusur olup olmadığının tespitinde kullanılmaktadır.

Tuz testi yapılırken bu testin gerçekleşmesi için özel üretilmiş kabinler kullanılmaktadır. Bu kabinlerin test numunesiyle temas eden bütün parçaları elektrolitik korozyona neden olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Sıvı tuz çözeltisinin içinde bulunduğu depo çözeltiden olumsuz etkilenmeyecek ve herhangi bir tepkimeye girmeyecek plastik, cam gibi malzemelerden yapılmalıdır. Tuz çözeltisi filtre edilerek ıslak yoğun bir sis oluşturulmalıdır ve püskürtücü nozullar yardımıyla test odasına gönderilir. Sistemin şematik gösterimi Şekil-3.26’ da verilmiştir. (Jimmie Barnett, 2008)



Şekil 3.26. Tuz Sisi Püskürtme Sistemi (Jimmie Barnett, 2008)

Çalışmamızda numunelerimizin korozyon dirençlerinin saptanabilmesi maksadıyla tuz testleri ASTM B 117 standardına göre sürdürülmüş olup tuz çözeltisinin derişim oranı %5 olarak de-iyonize su kullanarak hazırlanan tuz çözeltisi, sise dönüştürülerek test odasına doldurulmuş tüm numuneler 100 saat süreyle ve 30° açıyla test odasında kalmıştır. Testlerin yapıldığı tuz testi kabininin görseli Şekil-3.27’ de verilmiştir.



Şekil 3.27. Singleton Marka Tuz Testi Kabini

3.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, test kuponlarının yüzeyini elektron demeti ile tarayarak karakterize etme yeteneği bulunan milimetrik düzeyden nanometre ölçeğe, numunenin atomik çözünürlüğe kadar inceleme yapılmasına müsaade eden bir cihazdır. Vakumlu bir inceleme odacığında 12 mm uzaklıktan, kuru ve iletken yüzeylerin incelenmesinde kullanılır. İncelenen test kuponunun yüzdesel olarak belli limitler dahilinde elementlerin içeriğini belirleyebilir.

Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu

elektronlar ikincil elektron olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topoğrafik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır (Vikipedia, 2022). Sistem, Şekil-3.28’ de verilmiştir. (Zeiss Ultra plus)

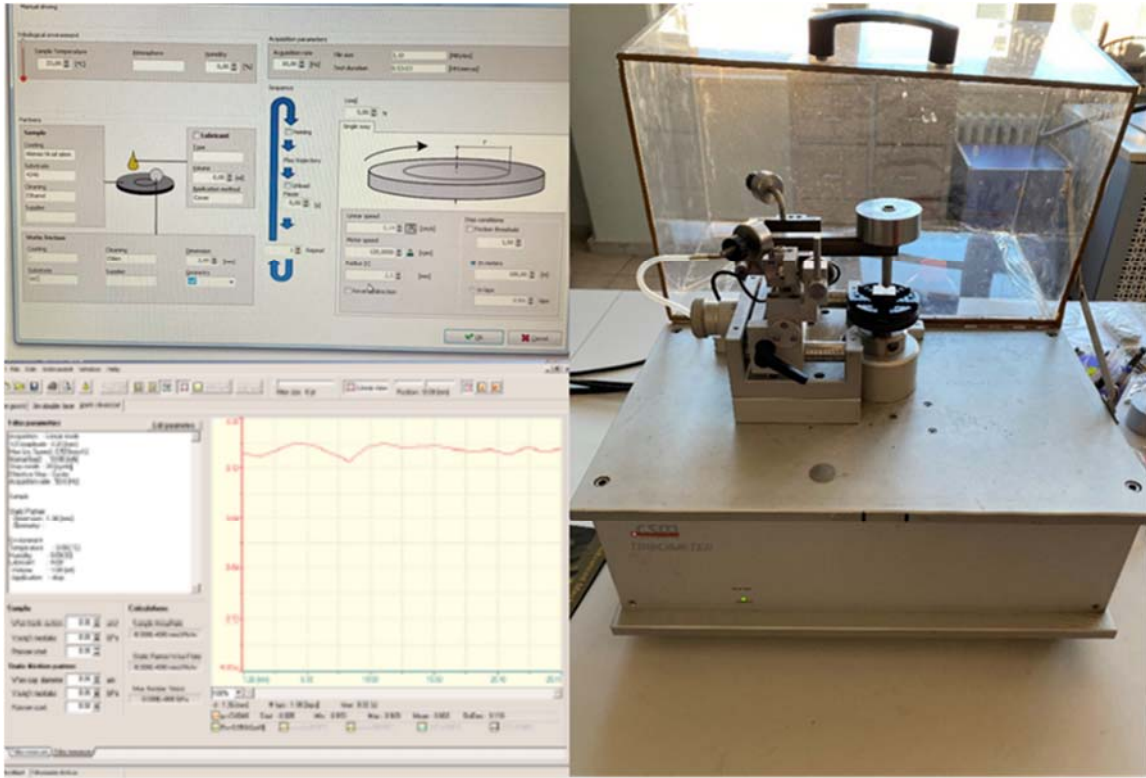


Şekil 3.28. Taramalı Elektron Mikroskobu

3.3.6. Aşındırma Test Cihazı

Aşındırma testleri ESOGU triboloji laboratuvarında yürütülmüş olup çalışmamızda kullandığımız CSM instrument markalı tribometre, aşındırma cihazı, bilinen bir yükü düz, pin tipi veya küresel (bilye) bir uç ile test numunesine verebilen ve rijit tasarımı ve sürtünmesiz kuvvet ölçüm sistemi sayesinde doğru ve tekrarlanabilir ölçümler yapabilmektedir. Bu cihaz ASTM G99 ve DIN 50324 standartlarında test yapabilmektedir. Aşındırma cihazı hem doğrusal hem de dairesel hareketlerle aşındırma yapabilmektedir.

Aşındırma cihazında, farklı yükler ve farklı malzemeden yapılmış aşındırıcı uçlar kullanılarak farklı hızlarda testler yapılabilir. Yapılan testler sonucunda test edilen numunenin üzerinde oluşan aşınma izlerinin alanı ölçülerek, numunen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı hesaplanabilmektedir. Çalışma yürütülürken her iki malzeme grubundan toplam 8 adet aşınma testi 5 mm çapında WC (Tungsten Carbide) bilye uçlu aşındırıcı ile 5 Newton yük altında 100 metre ilerleme değeri, 3 cm/sn çevresel hız seçilerek gerçekleştirilmiştir. Aşınma test cihazı, tribometer cihazının görseli ve yazılım ekranı şekil-3.29’ da verilmiştir.



Şekil 3.29. CSM instruments marka Aşındırma Cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Verilerin Toplanması ve Çözümlemesi

Sert krom kaplamalar ile akımsız nikel kaplamalar arasında tribolojik performans karşılaştırılması yapılabilmesi için aynı tür malzemeye kaplanmış olan hem sert krom hem de akımsız nikel kaplamalar incelemeye tabi tutulmuştur. Değerlendirme yapılabilmesi aynı malzeme üzerinde farklı iki kaplama aşağıdaki başlıklara göre karşılaştırılacaktır;

- ❖ Görünüş ve Yapışma Testleri
 - Kuponların Görsel Kontrolü
 - Kaplamaların Kesit Görünüşleri
- ❖ Tahribatlı Testler
 - Bükme Testi
 - Bükerek Kırma Testi
- ❖ Kalınlık Ölçümleri
- ❖ Mikro Sertlik Testleri
- ❖ Korozyon Testleri (Tuz Testi)
- ❖ Aşınma Testleri

Sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen test bulguları ve literatürde daha önce yapılan benzer tribolojik incelemelerden yararlanılmıştır.

4.1.1 Görünüş ve Yapışma Testleri

Uygulanan kaplama sonrası test kuponları;

- ❖ Görsel kontrol-göz kontrolü
- ❖ Bükerek kırılmış kuponlara mikroskop altında 6x ve 16x büyütme yapışma kontrolü
- ❖ Kalıba alınarak mikroskop altında 200x ve 500x büyütme kontrol

Edilme işlemlerine tabi tutularak inceleme yapılmıştır

4.1.1.1. Kuponların Görsel Kontrolü

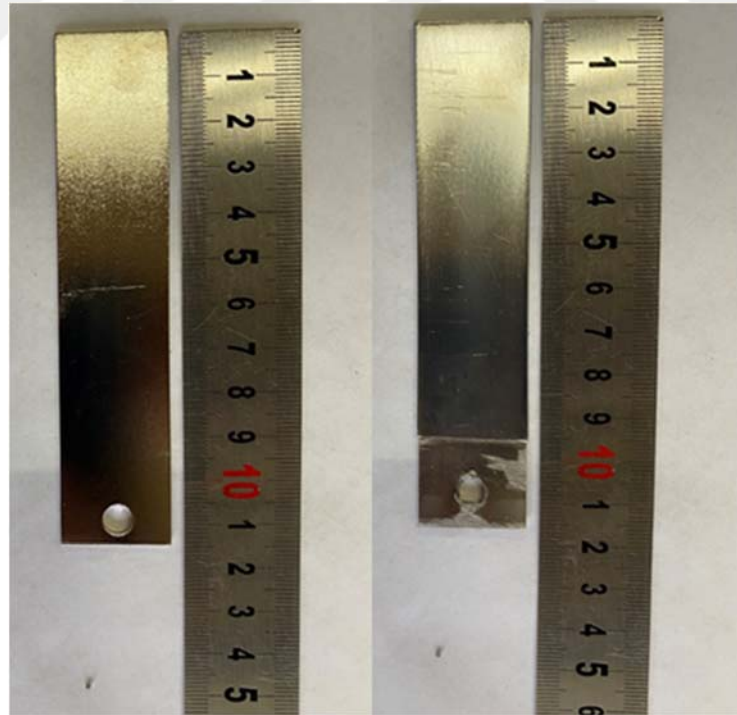
Üretilen kuponların kaplama sonrası göz kontrolüne tabi tutularak kaplama aşamasında bir kusur olup olmadığının ön değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kontrol yapılırken kaplanan ana malzemenin yüzeyinde tomurcuklanma, oyuntu, çatlak vb. açısından bir problem olup olmadığı incelenmiştir. Herhangi bir aksaklıkla karşılaşılmemiştir, Kaplanan test numunelerinin herhangi bir tahribatlı ya da tahribatsız bir incelemeye tabi tutulmadan önceki göz kontrolü esnasında çekilen görselleri Şekil-4.1' den Şekil-4.5' e aşağıda verilmiştir.



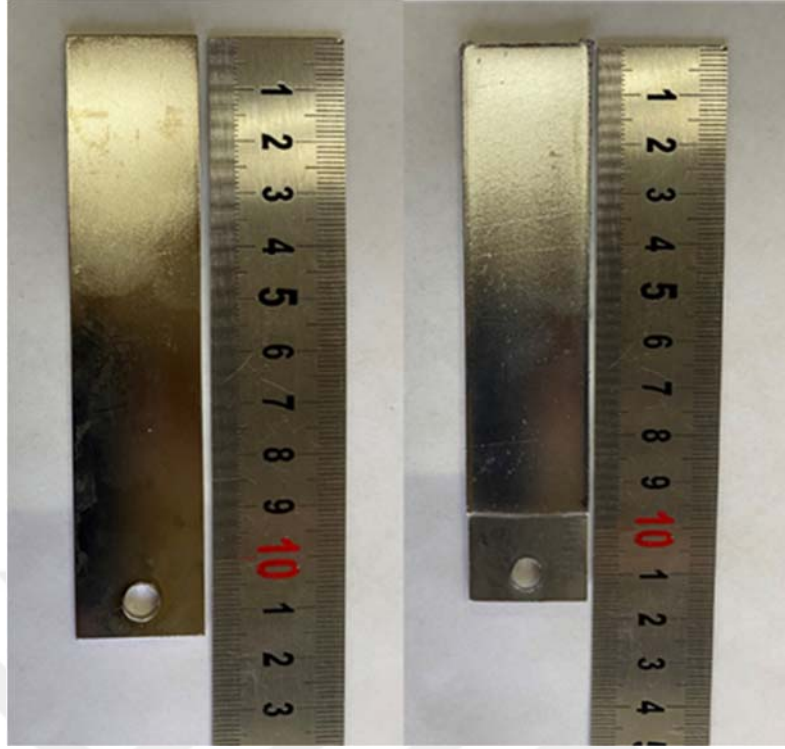
Şekil 4.1. 301 Çeliğine ait kuponlar Akımsız Nikel(Sol), Sert Krom (Sağ)



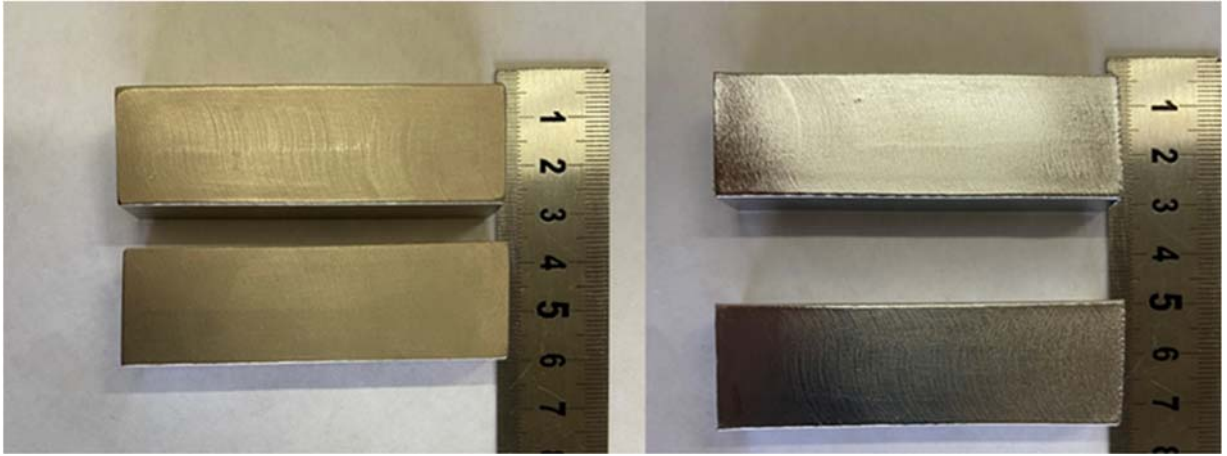
Şekil 4.2. AISI 1020 Çeliğine ait Kuponlar A. Nikel (sol), Sert Krom (sağ)



Şekil 4.3. AISI 301 Çeliğine ait Kuponlar A.Nikel(sol), Sert Krom (Sağ)



Şekil 4.4. AISI 4130 Çeliğine ait Kuponlar A.Nikel(sol), Sert Krom(sağ)

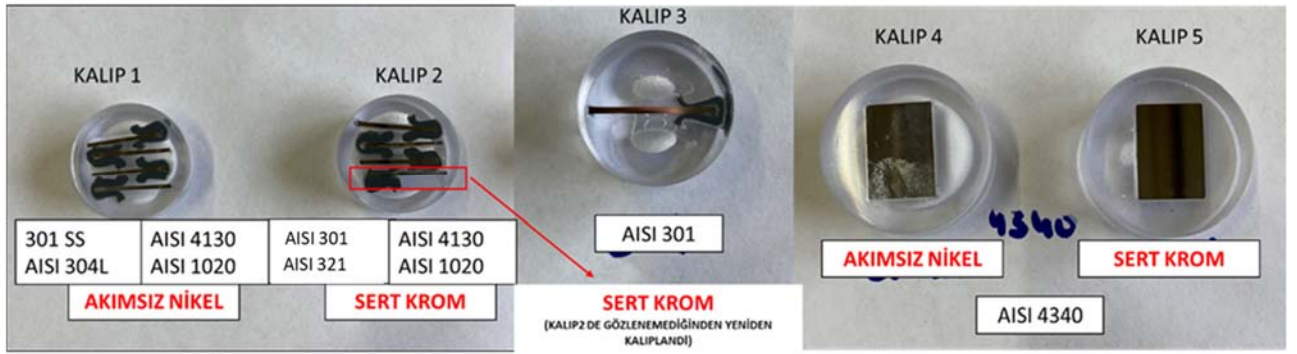


Şekil 4.5. AISI 4340 Çeliğine ait Kuponlar A. Nikel (Sol), Sert Krom(Sağ)

Göz Kontrolü: kaplama işlemi yapılan 84 adet test kuponundan her biri yüzeyde kaplamada renk farkı, tomurcuklanma, çukurlaşma, kaplama birikintisi vb. yönüyle herhangi bir aksaklık olup olmadığı yönüyle incelenmiş ve hiçbir test kuponunda bir aksaklıkla karşılaşılmamıştır.

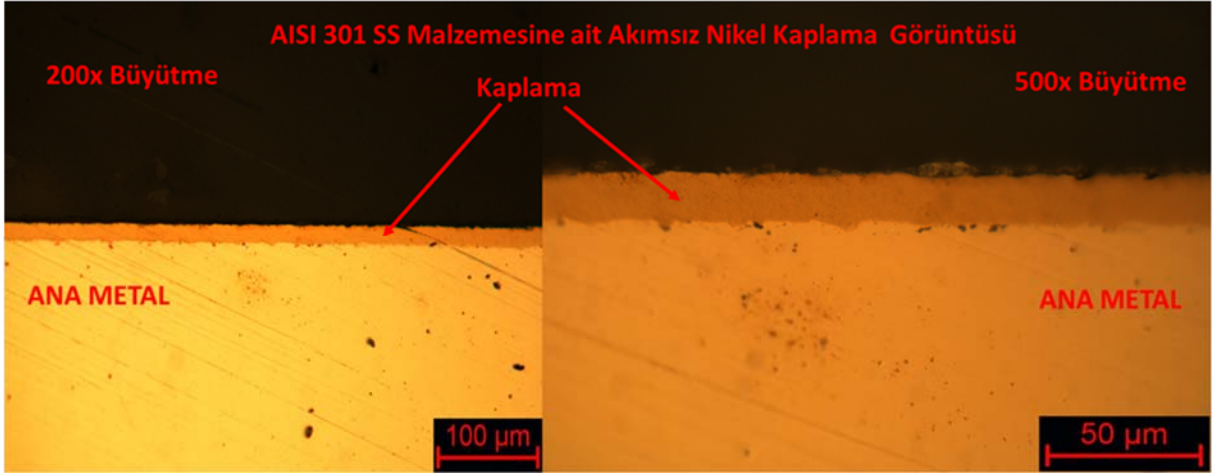
4.1.1.2. Kaplamaların Kesit Görünüşleri

Kaplanmış test kuponları mikroskop altında incelemek için kesit alınarak kalıplanmıştır. Bu inceleme sayesinde kaplamanın yüzey altında tespit edilmesi zor olan mikro çatlaklarının olup olmadığı, kaplamanın yapışma durumu tayin edilebilir. Ayrıca mikro ölçekte kaplama kalınlığı ölçümü bu sayede yapılmaktadır. Test kuponlarının üzerinden incelemeye en uygun noktalardan alınan kesitler kalıplanarak incelemeye hazır hale getirilmiştir. Kalıp-1' de akımsız nikel test kuponları gruplanmış, kalıp-2' de ise sert krom test kuponları gruplanmış. Test kuponlarından kalıp 2 içerisinde bulunan AISI 301 malzemesine ait numune kalıp içinde açılı şekilde kaldığından inceleme esnasında yanıltıcı sonuçlar oluşturmaması için başka numunedan yeniden kalıplanarak kalıp-3 oluşturulmuş ve inceleme bu kalıp üzerinden yürütülmüştür. Test kuponlarından AISI 4340 diğer malzemelerin test kupon ölçüsünden farklı bir ölçüde olduğundan akımsız nikel kaplı kupon için kalıp- 4 ve sert krom kaplı kupon için ise kalıp-5 olarak ayrı bir şekilde kalıplanmıştır. Kalıplanan numunelerin görselleri Şekil-4.6' da verilmiştir.

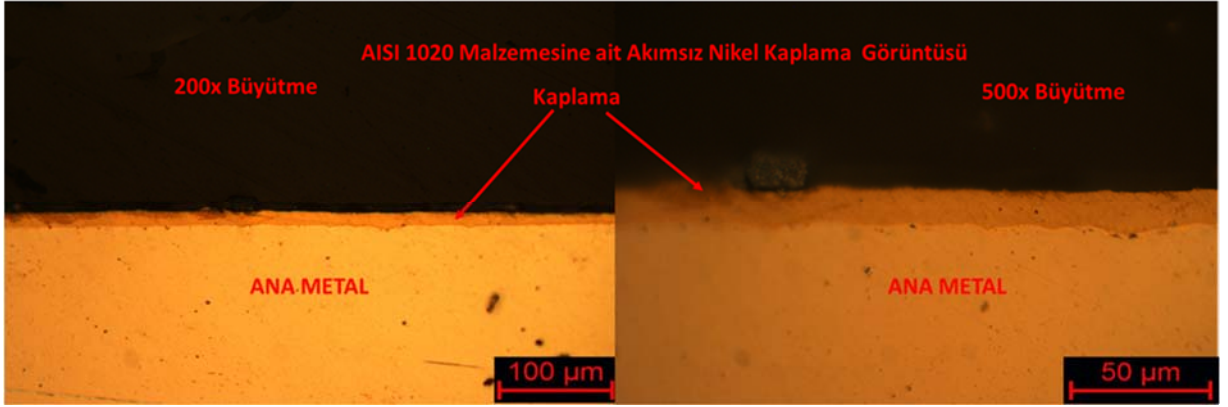


Şekil 4.6. Kaplanan Test Kuponlarının Kalıpları

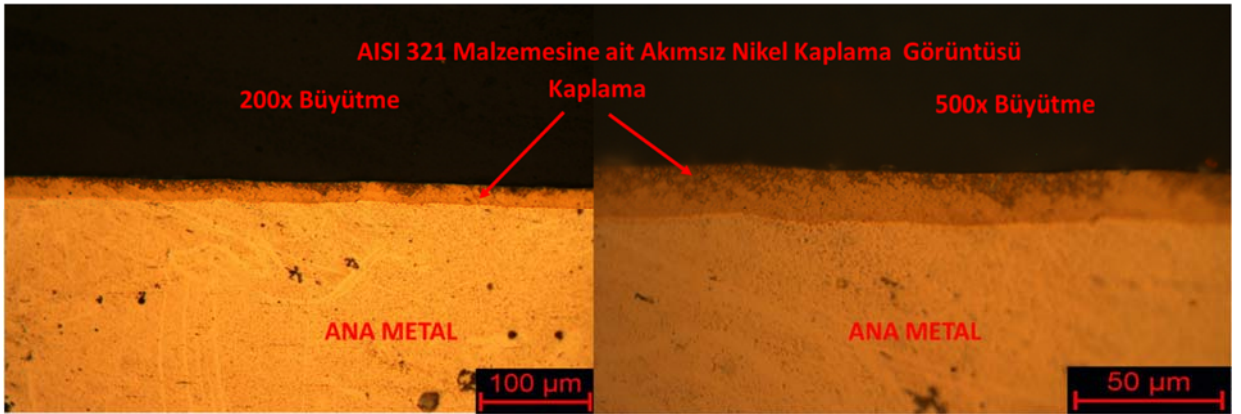
Kesit Görünüş Kontrolü: test kuponlarından hazırlanan numuneler incelenmek üzere kalıba alınmıştır. Kalıba alınan test kuponları 200x ve 500x büyütme ile mikroskop ve SEM incelemelerine tabi tutulmuştur. Kaplamalarda ana malzemeye yapışma, kaplamanın kendi katmanları arasında yapışma problemi çatlak, boşluk vb. yönüyle incelenmiş ve herhangi bir problem ile karşılaşılmemiştir. Görüntüler Şekil-4.7- 4.21 arasında verilmiştir.



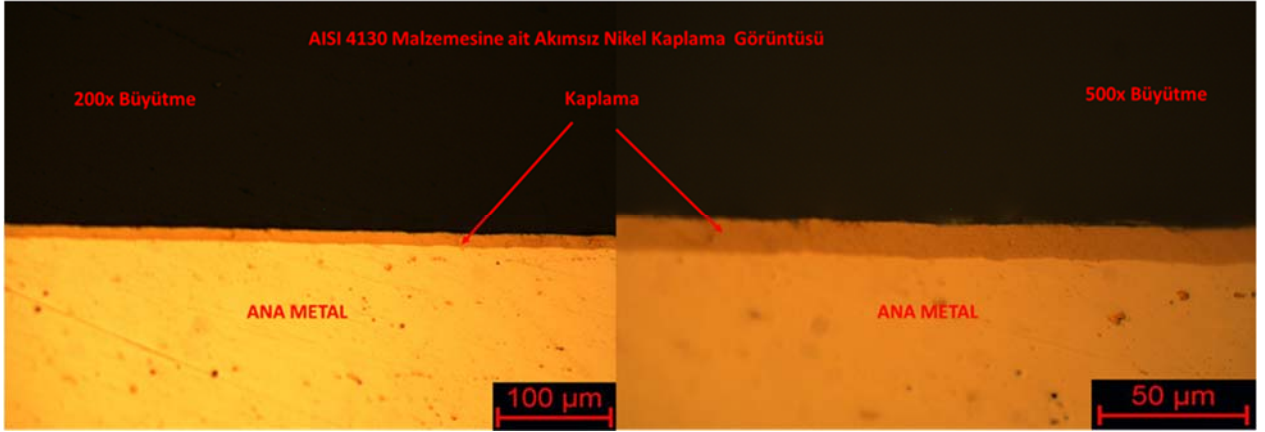
Şekil 4.7. AISI 301 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



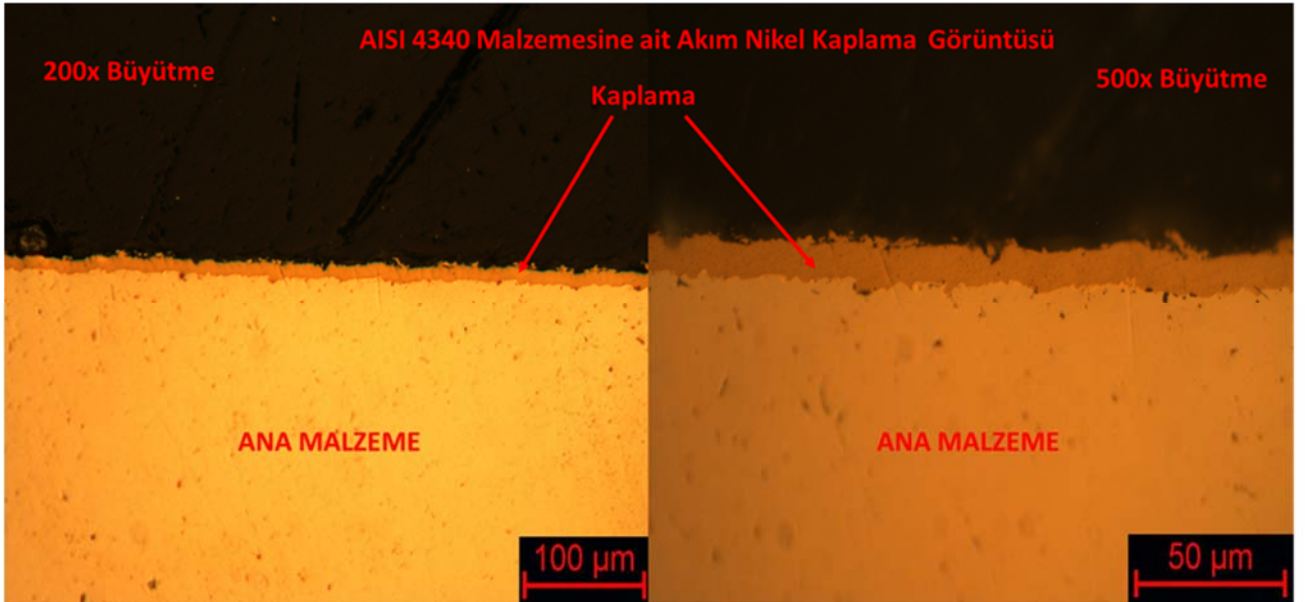
Şekil 4.8. AISI 1020 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



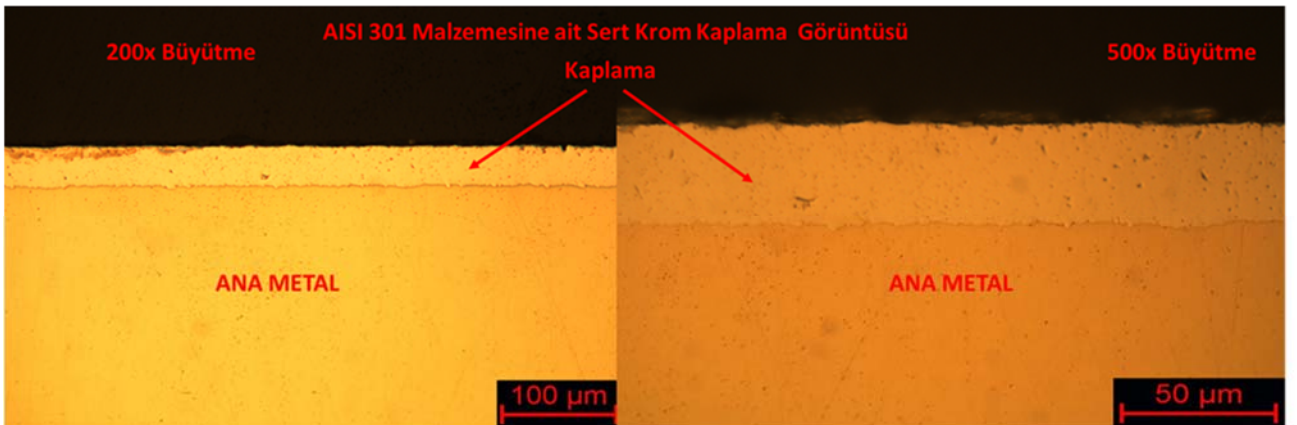
Şekil 4.9. AISI 321 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



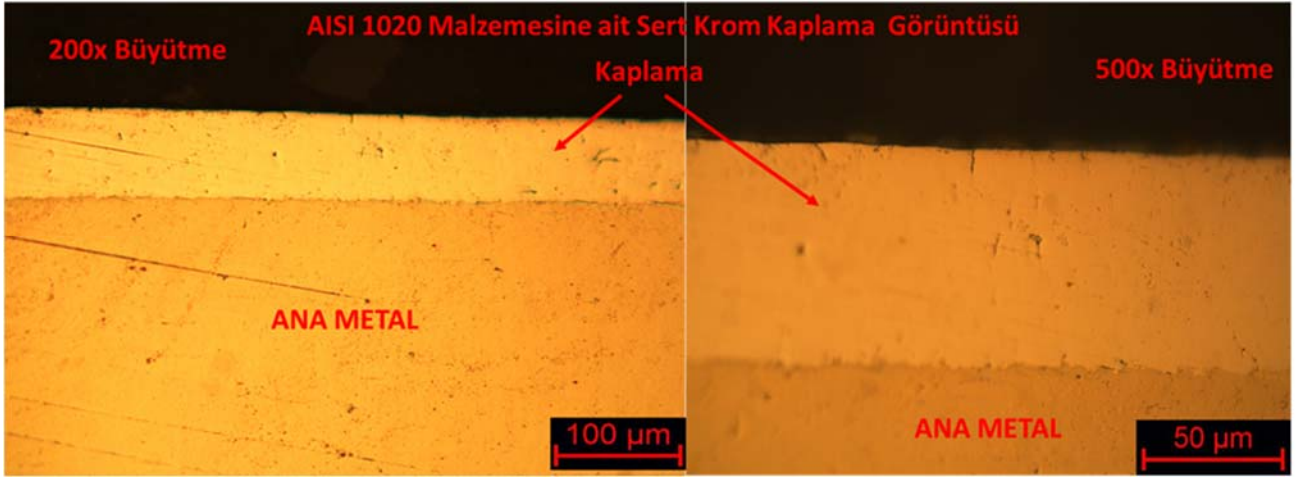
Şekil 4.10. AISI 4130 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



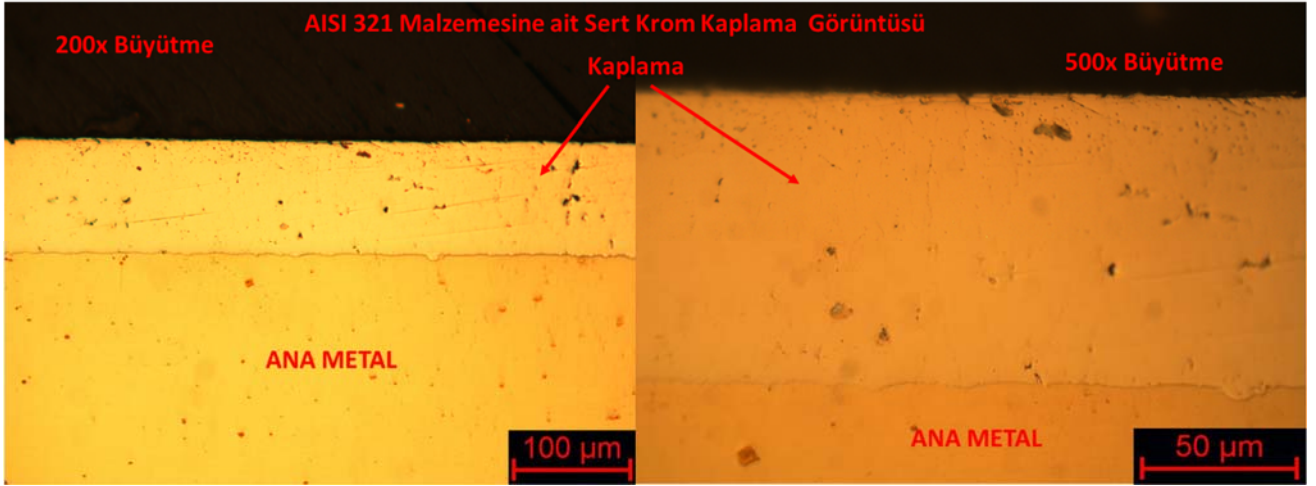
Şekil 4.11. AISI 4340 Test Kuponu Akımsız Nikel Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



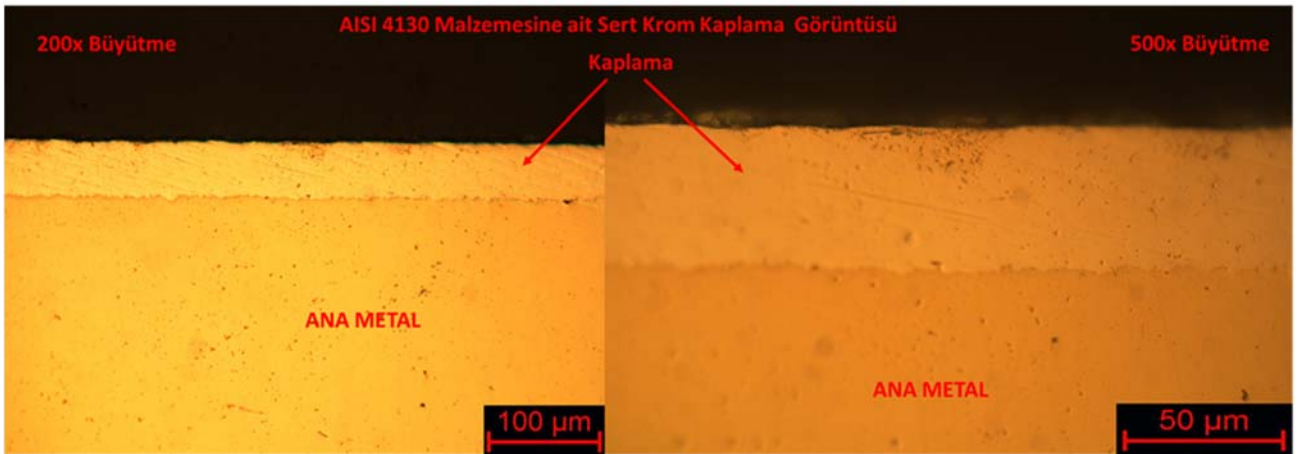
Şekil 4.12. AISI 301 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



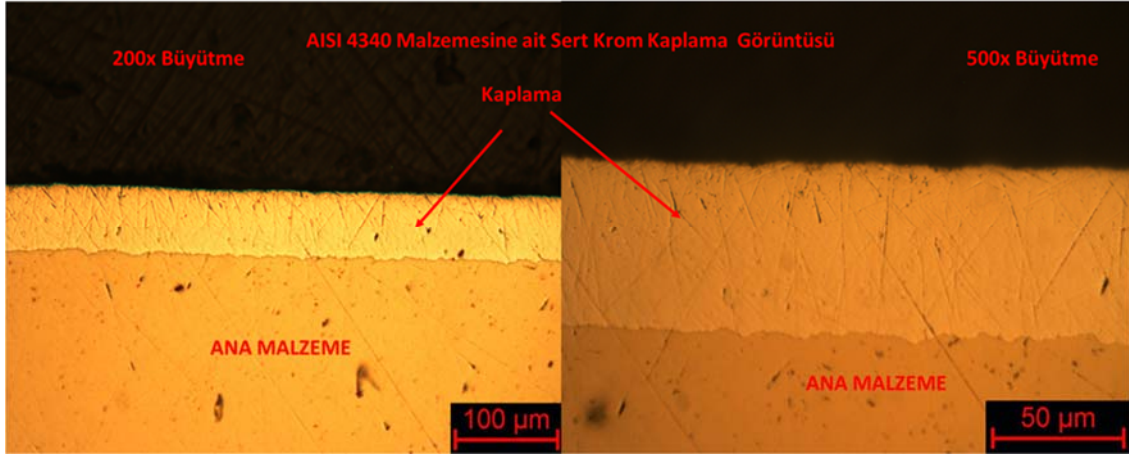
Şekil 4.13. AISI 1020 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



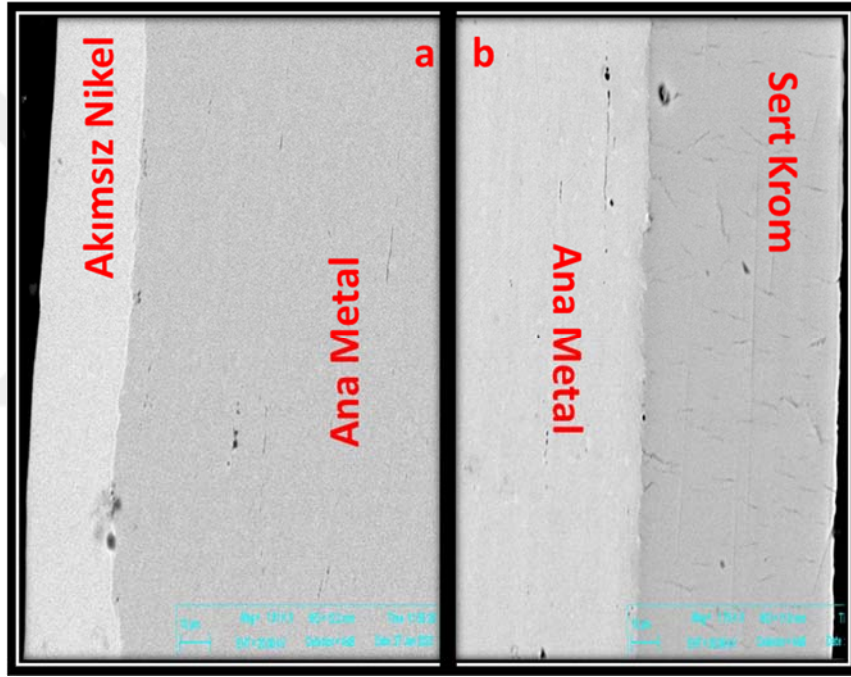
Şekil 4.14. AISI 321 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



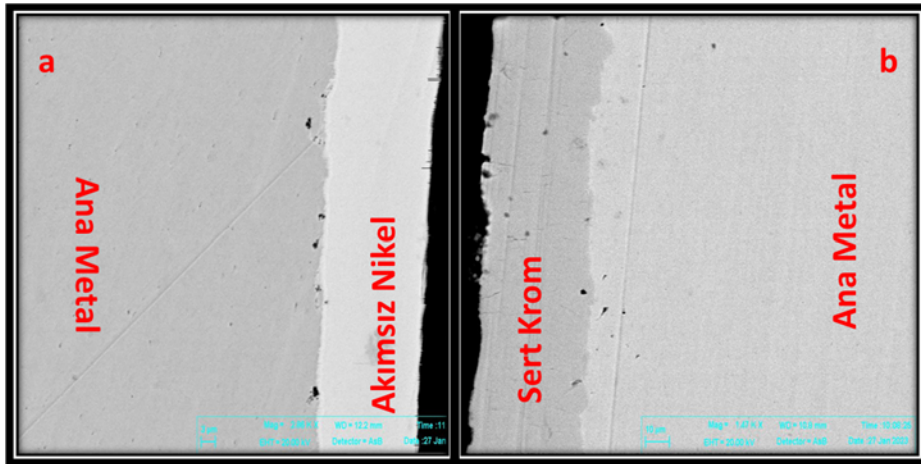
Şekil 4.15. AISI 4130 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



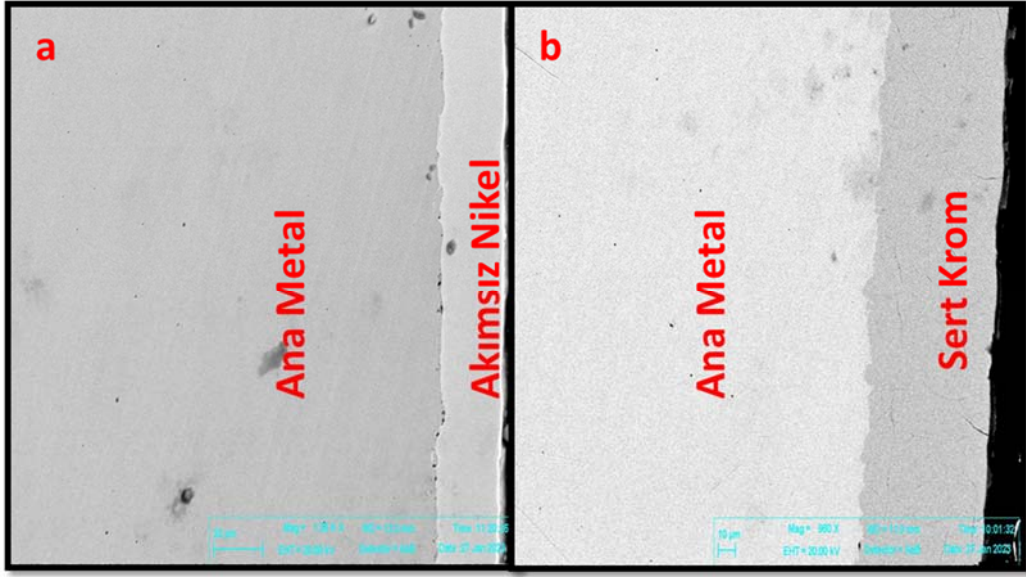
Şekil 4.16. AISI 4340 Test Kuponu Sert Krom Kaplama Görüntüsü 200x(sol), 500x(sağ)



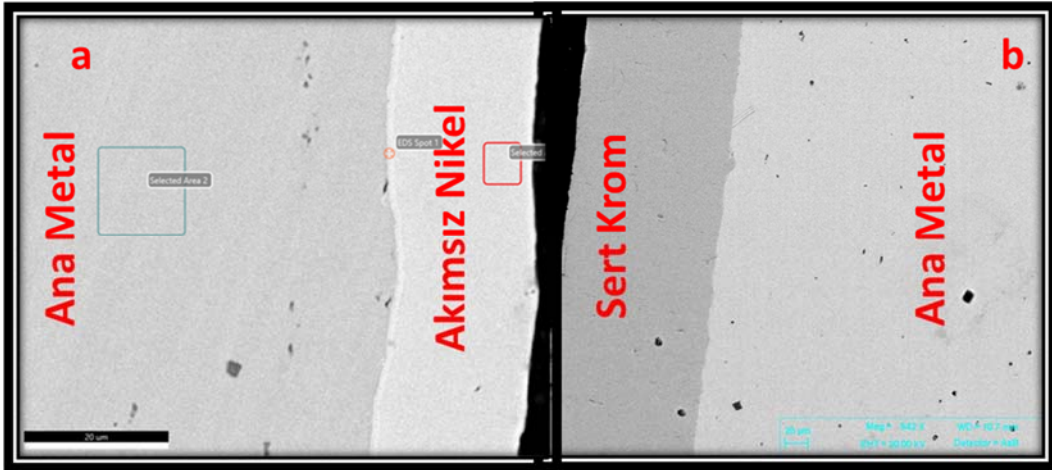
Şekil 4.17. AISI 4130 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü



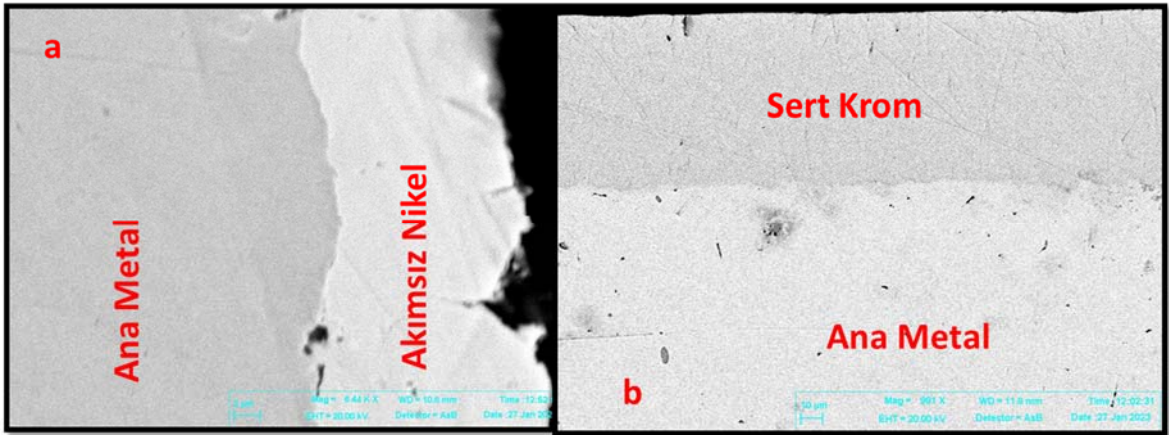
Şekil 4.18. AISI 1020 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü



Şekil 4.19. AISI 301 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü



Şekil 4.20. AISI 321 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü



Şekil 4.21. AISI 4340 a-) Akımsız Nikel, b-) Sert Krom SEM Görüntüsü

4.1.2. Tahribatlı Testler

Bir kaplama işlemi sonrası kaplama yapılan parça yüzeyine görsel kontrol yapılması kaplamanın ana malzemeye veya kaplamanın kendi katmanları arasında yapışma durumu hakkında fikir vermesi mümkün değildir, sadece büyük bir aksaklığın tespitini sağlamaktadır. Ancak kaplamanın ana malzemeye düzgün bir şekilde yapışıp yapışmadığının tam tespiti, test kuponlarına tahribatlı muayene yapılarak kaplamanın incelenmesi ile sağlanır. Tahribatlı testler, akımsız nikel kaplamalar için SAE-AMS-QQ-N-90 standardında test kuponunu bükerek kaplamanın kalkma durumunun incelenmesi şeklinde verilmiştir. Sert krom kaplamalarda ise AMS-2406-N' de bükerek kırma ve büyütme ile inceleme şeklinde verilmektedir.

Bükme testleri, normal şartlarda standartlar gereği sert krom kaplı test kuponlarına uygulanmaz ancak bu çalışmamızda amaç karşılaştırma yapmak olduğundan ve yeterli sayıda test kuponu bulunduğundan dolayı sert krom kaplı numunelere de bükme testi uygulanmıştır.

4.1.2.1. Bükme Testleri

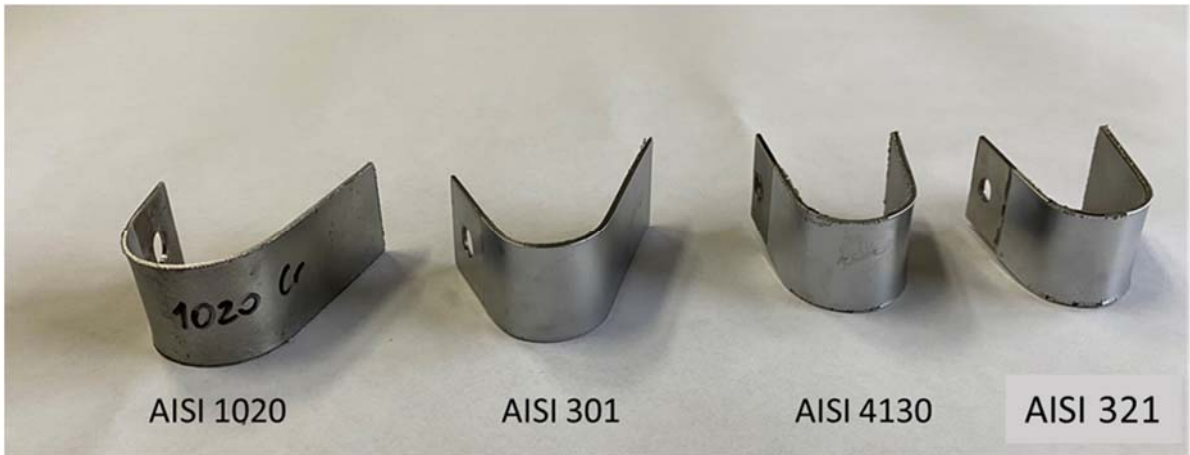
Bükme testi bir kaplamanın yapışma dayanımının test edildiği en önemli testlerden biridir. Bu sayede kaplamanın yapışma mukavemeti hakkında daha kesin bir yorum yapılabilmektedir. Her malzeme grubundan (AISI 4340 hariç) 8 adet test kuponu bükülmüş ve kaplama durumları gözlenmiştir.

Bükme testinde akımsız nikel kaplı test kuponlarında 7 adet test kuponunda bir aksaklık görülmemiştir ancak 1 adet AISI 4130 bükme testinden geçememiş akımsız nikel kaplamada kalkmalar gözlenmiştir bu durum Şekil-4.22' de gösterilmiştir. Bunun üzerine yeni bir test kuponu üzerinde test tekrarlanmış ve bu kuponda bir problem görülmemiştir. Yaşanan problemin kök nedeni, test kuponunun kaplama işlemi esnasında temizleme konusunda bir eksiklikten kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Krom kaplanmış test kuponları üzerinde uygulanan bükme testinde, kaplamada herhangi bir aksaklık görülmemiştir. Ancak AISI 4340 çeliğinin sac kuponu tedarik edilemediğinden büküm testleri yapılamamıştır. Akımsız nikel kaplı test kuponlarına ait test sonrası görüntüler Şekil-4.22, sert krom test kuponlarının büküm sonrası görselleri ise Şekil-4.23’ de sunulmuştur.



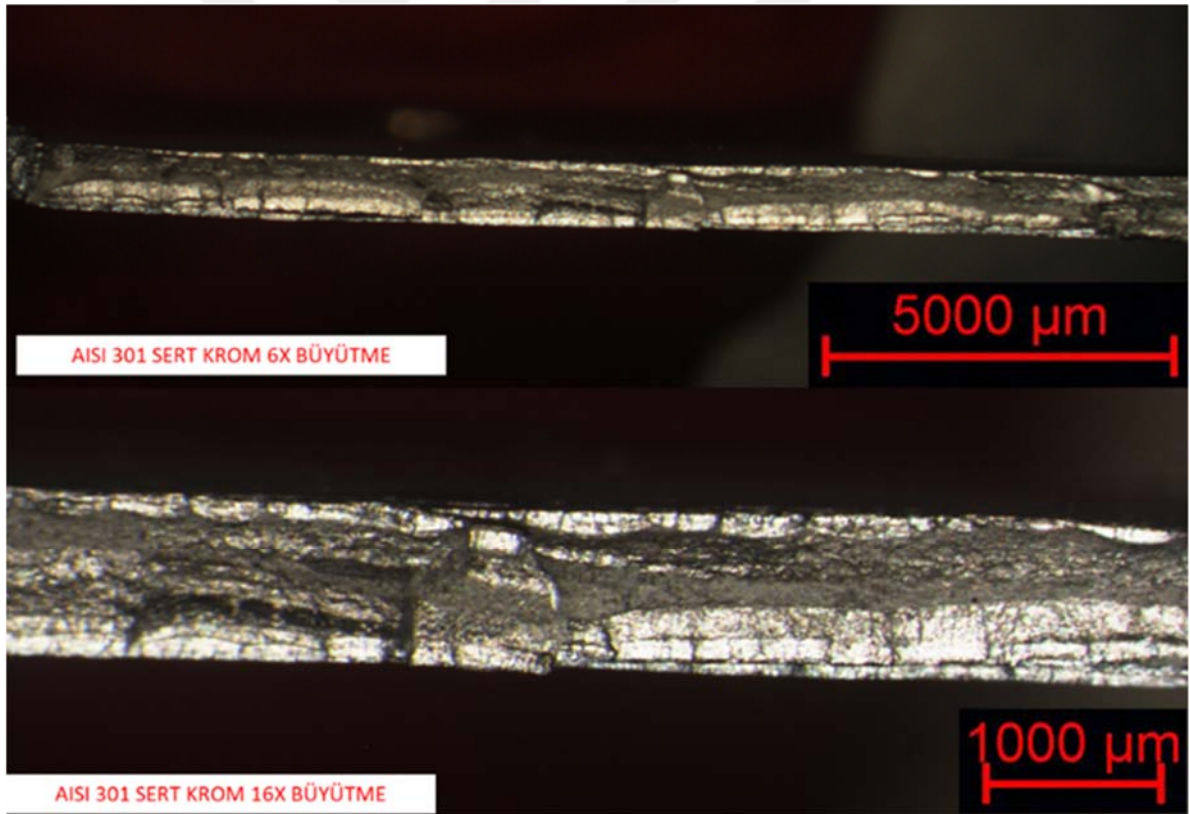
Şekil 4.22. Akımsız Nikel Test Kuponlarının Büküm Sonrası Görüntüleri



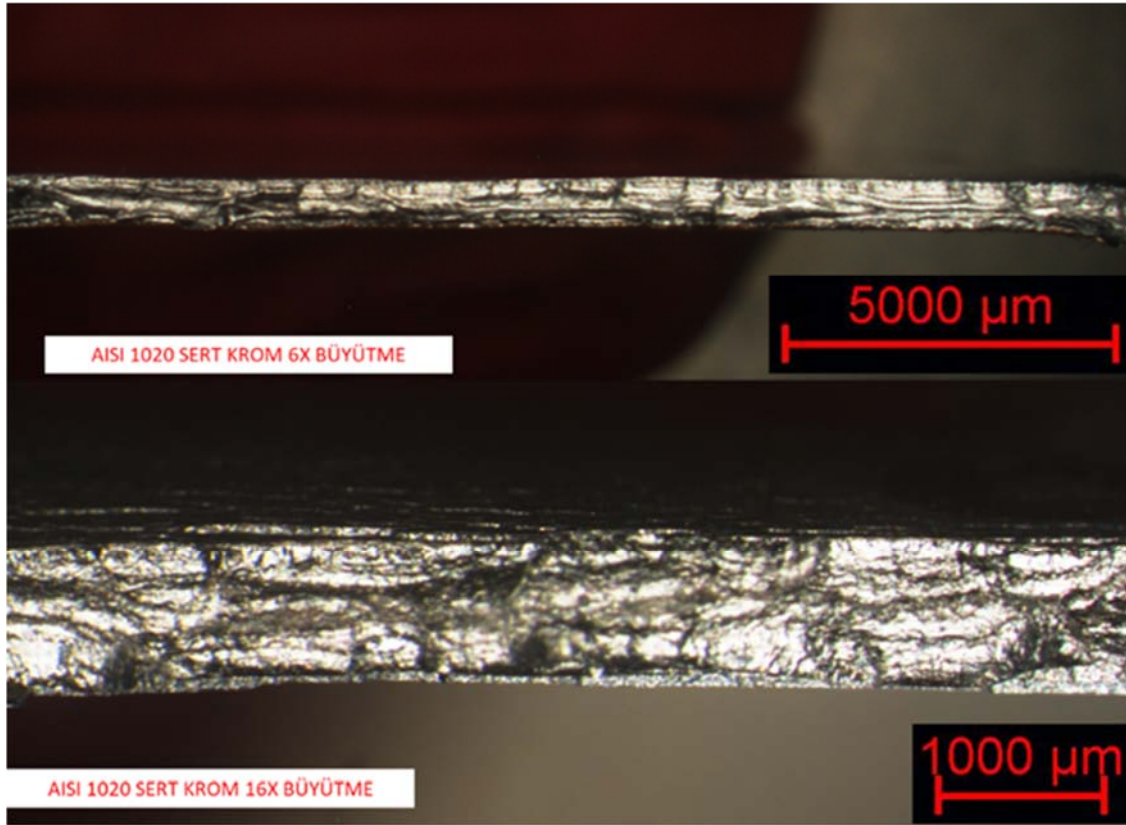
Şekil 4.23. Sert Krom Test Kuponlarının Büküm Sonrası Görüntüleri

4.1.2.1. Bükerek Kırma Testi

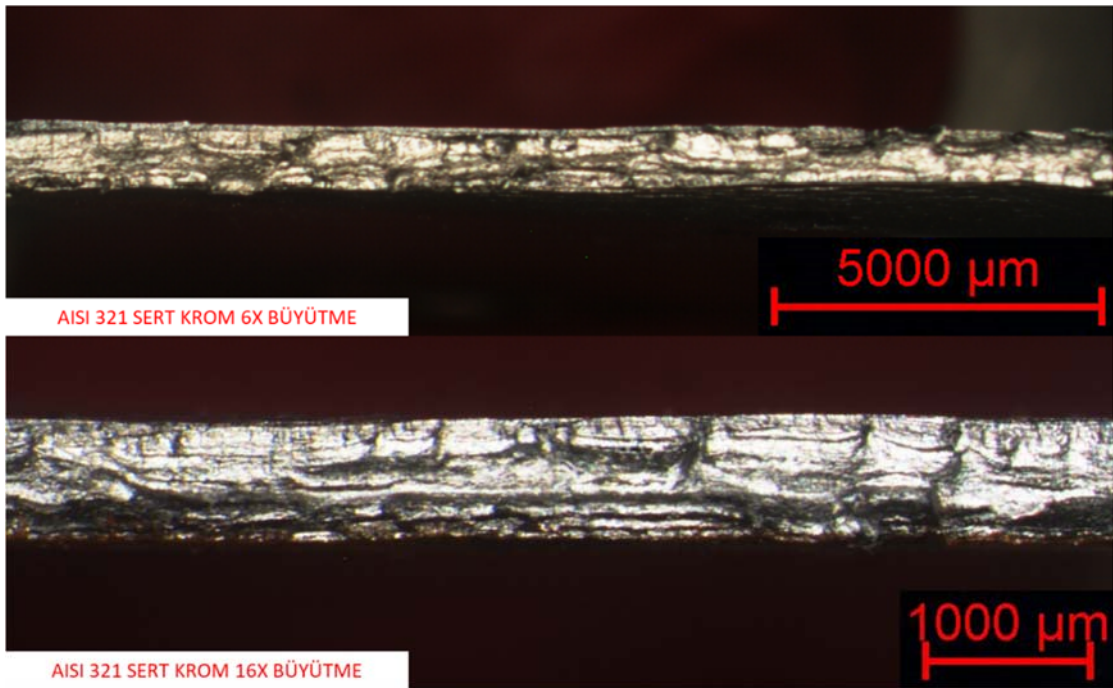
Sert krom kaplamalı test kuponları mengeneyle bağlanarak tekrarlı büküm hareketleri ile kırılan test kuponuna göz ve büyüteç yardımıyla inceleme yapılarak kaplamada bir aksaklığın olup olmadığı tespit edilir. Bu testin akımsız nikel kaplamalarda uygulanmamasının bir sebebinin kaplamaların sert kroma göre ince olması düşünülmektedir. Sert krom kaplanmış kuponlar kırıldıktan sonra kırılma bölgesinden kaplamanın ana malzemeye yapışması ve kaplamanın kendi katmanları arasındaki yapışma durumu mikroskop altında incelenmiştir. Test kuponlarında kaplama kısımlarının bütünlüğünü koruduğu ve bir problem olmadığı görülmüştür. Test kuponları üzerinde sürdürülen bu çalışmalar Şekil-4.24' den Şekil-4.27' e kadar aşağıda verilmiştir.



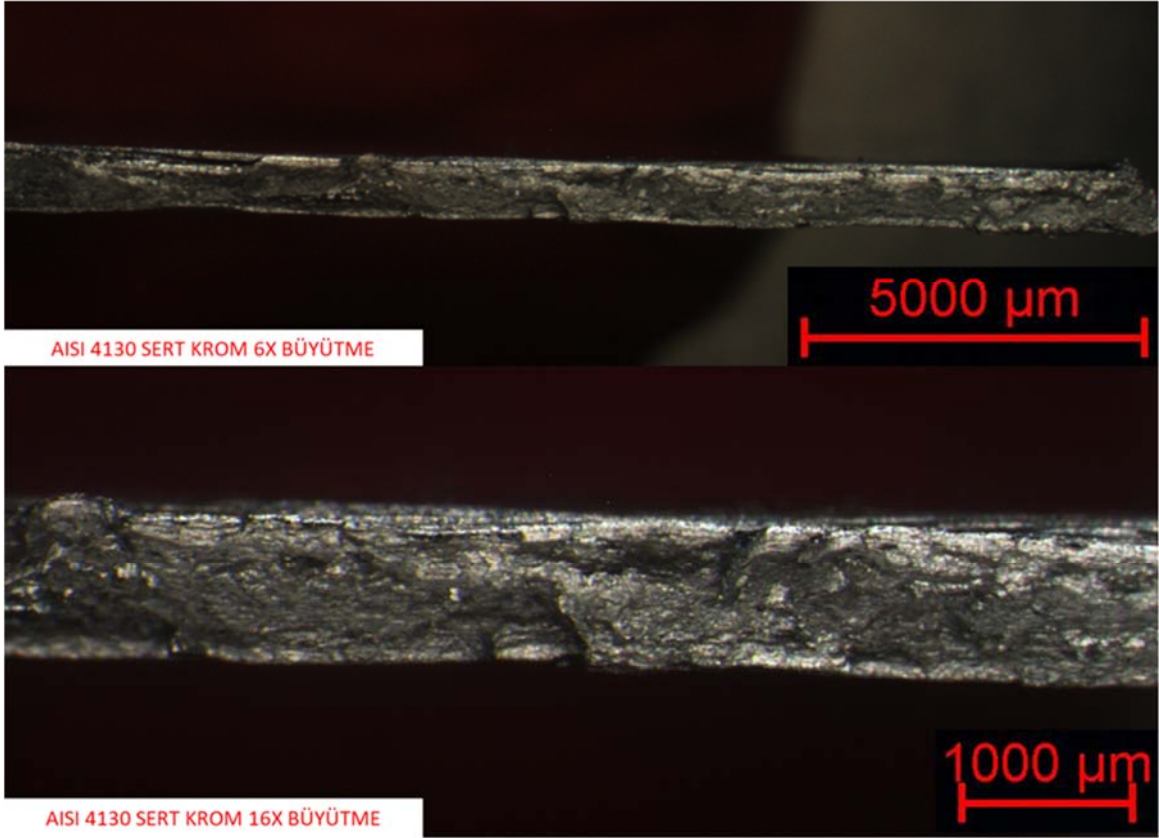
Şekil 4.24. AISI 301 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme



Şekil 4.25. AISI 1020 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme



Şekil 4.26. AISI 321 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme



Şekil 4.27. AISI 4130 Çeliği Görünüşleri 6x ve 16x Büyütme

4.1.3. Kalınlık Ölçümleri

Bir kaplama işleminin uygulama süresini belirleyen parametre kaplama kalınlığıdır ki bu parametre kaplamanın birçok fiziksel özelliğini de etkilemektedir. Kalınlık ihtiyaca göre çeşitlilik gösterebilir. Üreticiler bir kaplamanın hangi kalınlıkta olması gerektiğini önceden belirleyerek imalat sürecinde ana malzemenin tasarımını, Tamir aşamasında ise uygulanacak limitleri belirlemektedirler. Ayrıca kaplama standartlarında bu kaplamaların hangi sınıf için hangi aralıkta olması gerektiği bildirilmiştir. (SAE, 2015) Standardında sert krom kaplamalar için mühendislik(Sınıf-2) uygulamalarında kalınlığın 50-380 mikron aralığında olması gerektiği bildirilmiştir. Sert krom kaplamanın bir avantajı yüksek kaplama kalınlıklarına ulaşılabilmesidir. Ancak literatüre göre belli bir kalınlığın altında sert krom kaplamalarda mikro çatlaklar görülmekte bu sebeple kalın kaplamalar kullanılması oluşacak çatlakların önüne geçmektedir (Svenson, 2006). Bu sebeple sert krom kaplamalarda, istenilen değerden biraz fazla kaplanarak sonrasında taşlama işlemi esas ölçüye getirmek sağlıklı kaplama elde etmek için uygulamada sıkça kullanılan bir yöntemdir.

Sert krom kaplamalarda, kaplama kalınlığı özellikle 13 mikron kalınlığa kadar sertlikle doğru orantılı arttığı ve 50 mikron altı kaplama kalınlıklarında ise kaplama içerisinde mikro çatlaklara sık karşılaşıldığı ancak daha kalın kaplamalarda ise bu mikro çatlaklar ile karşılaşılmasının çok azaldığı literatürde verilmiştir (Eriksson, 2014).

Akımsız nikel kaplamalarda ise sert krom kaplamaların aksine yüksek kaplama kalınlıklarına çıkılamamaktadır. Bu durum akımsız nikel kaplamanın bir olumsuz özelliği olarak görülmektedir. Çalışmamızda elde ettiğimiz test kuponları hem kaplama esnasında makro ölçüm ile kontrol edilmiş hem de mikro kaplama kalınlıkları ölçümü yapılmıştır. Karşılaştırılmalarda daha etkili sonuçların alınabilmesi için mikro kalınlık ölçümleri kullanılmıştır.

Isıl işlem sonrası akımsız nikel kaplama kalınlıklarında kayda değer bir değişim görülmemiştir. Bu durum, literatürde verilen Ni-P akımsız nikel kaplamaya uygulanan ısı işlem kaplama kalınlığını ve kimyasal bütünlüğü etkilemez ifadesini doğrulamaktadır. (Buchčík, Krystýnová, & Másilko, 2019). Test kuponlarının kalınlık ölçüm sonuçları Çizelge-4.1’ de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Test Kuponlarının Mikro Kaplama Kalınlıkları

Malzeme Adı	Sert Krom Mikro Kalınlık (μm)	Akımsız Nikel Mikro Kalınlık (μm)
AISI 1020	51.3	22.6
AISI 301	55	22.5
AISI 4130	63	30
AISI 4340	78.8	15.2
AISI 321	53.5	18.7

Kaplama kalınlığının net bir şekilde bilinmesi havacılık endüstrisinde ana malzemenin kalınlığının tamir edilebilir limitlerde olup olmadığının değerlendirilmesi bakımından çok kritiktir ve bu parametrelerin uygulama göre aralığı standartlarda verilmekte

ve sıkı bir şekilde kontrolü yapılmaktadır. Şekil-4.28’ de tüm malzeme gruplarında, her iki kaplamanın kalınlıkların karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.28. Kaplama Kalınlıkları Karşılaştırılmalı Grafik

Kaplama kalınlıkları karşılaştırıldığında AISI 4340 çeliğinde sert krom kaplama ile akımsız nikel kaplama kalınlıkları arasında büyük bir farkla karşılaşılmıştır.

Sert krom kaplama test kuponlarının hepsinde kaplama kalınlığı olarak hedeflenen 50 µm üzerine çıkmıştır. Sert krom test kuponları kaplama kalınlıkları incelendiğinde değerlerin 51.3 µm ile 78.8 µm kalınlıkları arasında değiştiği ve ortalama kaplama kalınlığının 60.32 µm olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler (SAE, 2015) standardında verilen sınıf-2 kaplama standardı olan mühendislik amaçlı sert krom kaplama kalınlığı değeri olan minimum 50 µm kalınlık değerini sağlamaktadır.

Akımsız nikel test kuponları kaplama kalınlıkları incelendiğinde değerlerin en düşük 15.20 µm ile 22.60 µm kalınlıkları arasında değiştiği ve ortalama kaplama kalınlığının 21.80 µm olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler AMS-C-26074 standardında verilen grade B kaplama kalınlığı olan minimum 0.0005” (13 µm) kısıtını sağlamaktadır. Sadece kaplama kalınlığı 30 µm olarak ölçülen AISI 4130 test kuponu, kaplama kalınlığı 0.0010 (25 µm) değerinden büyük olduğundan grade A sınıfına girmiştir. Bu ölçümler dikkate alındığında akımsız nikel kaplamaların sert krom kaplamalar ile karşılaştırıldığında, olumsuz özelliği olarak literatürde sıklıkla karşılaşılan kaplama kalınlığının sert krom kadar yüksek atılamadığı kanıtlanmış sert kromda 3 kat daha kalın kaplamalara ulaşılmıştır.

4.1.3. Mikro Sertlik Testleri

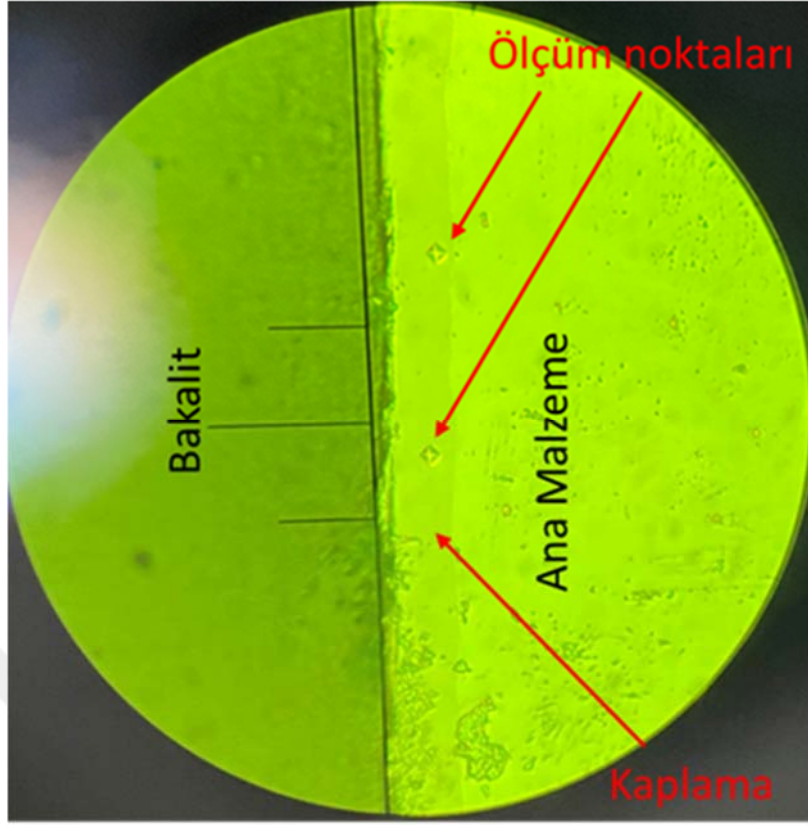
Sertlik değeri, kaplamalar için en önemli kriterlerden biridir. Ana malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği direnci arttıran tek faktör olmasa bile ana faktör kaplama sertliğidir. Sertlik ölçümleri, malzeme sınıflarına göre ana malzeme, akımsız nikel kaplama, sert krom kaplama ve ısıtılma işlemi tabii tutulan akımsız nikel kuponlarının şeklinde ilgili sütunda verilmiştir.

Akımsız nikel test kuponlarına uygulanan ısıtılma işlemi sayesinde, sertlik değerinde çok ciddi artış görülmüştür. Elde edilen ölçümler dört farklı noktadan yapılmış ve ortalama değerleri aşağıdaki Çizelge-4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Test Kuponlarının Kaplama Sertlik Değerleri

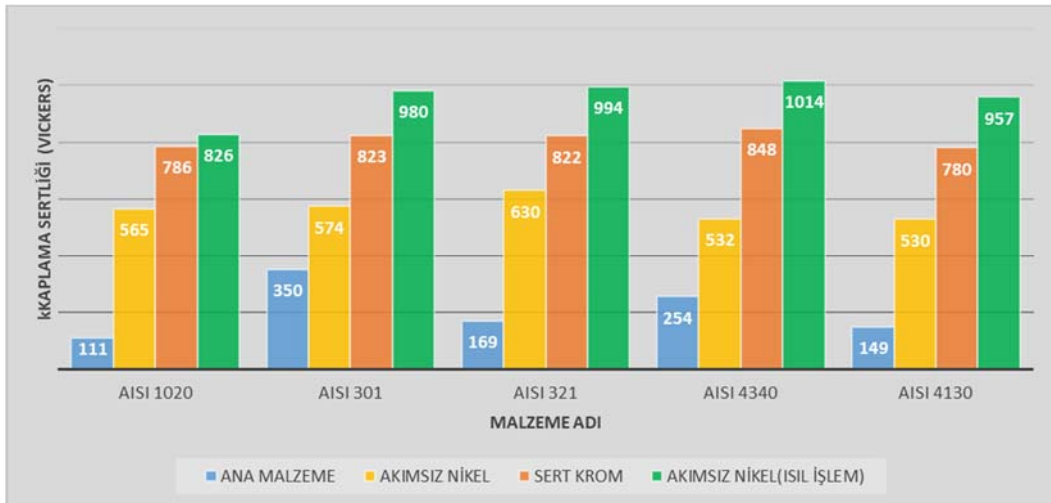
Malzeme Adı	Sert Krom Sertlik (HV)	Akımsız Nikel Sertlik (HV)	Isıl İşlem Uygulanmış Akımsız Nikel Sertlik (HV)	Ana Malzeme Sertlik (HV)
AISI 1020	786	565	826	111
AISI 301	823	574	980	350
AISI 321	822	630	957	169
AISI 4340	848	532	1014	254
AISI 4130	780	530	904	149

Ölçümler yapılırken özellikle akımsız nikel kaplı test kuponlarında, kaplama kalınlığının ince olması sebebiyle bakalit-kaplama veya ana metal-kaplama birleşim bölgelerine denk gelen bölgelerden ölçüm alınmamasına dikkat edilmiştir(Şekil.4.29).



Şekil 4.29. AISI 4130 Mikro Sertlik Ölçüm İşleminde

Çizelge-4.2’ de verilen Vickers sertlik değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği Şekil-4.30’ da sunulmuştur.



Şekil 4.30. Test Kuponlarının Kaplama Sertliklerinin Karşılaştırılması

Test kuponlarının kaplama sertlik değerleri karşılaştırıldığında ana malzeme sertliklerinin kaplama uygulamaları ile çok yüksek sertliklere çıkarılabildiği net bir şekilde görülmektedir. Normal şartlarda sert krom kaplamalar, akımsız nikel kaplamalara göre çok daha sert bir kaplamadır. Akımsız nikel kaplamalara uygulanan ısıtıl işlem sonrası akımsız nikel kaplamaların sertlik değerleri oldukça iyileştirilmiştir. En yüksek sertliğin 1014 HV sertlik değeri ile AISI 4340 akımsız nikel kaplanmış ve sonrasında ısıtıl işlem uygulanmış test kuponunda görülmüştür. Isıtıl işlem uygulaması ile akımsız nikel kaplamalar % 43-90 arasında iyileştirilmiştir.

Ana malzemelerin sertlik sıralaması, AISI 301, AISI 4340, AISI 321, AISI 4130, AISI 1020 şeklindedir. Ana malzeme sertlik değerleri ile kaplanmış kuponların sertlikleri karşılaştırıldığında çok ciddi sertlik artışları elde edilmiştir. Çizelge- 4.3’ de kaplama sertlik değerlerinin ana malzemeye göre yüzde olarak artış oranları verilmiştir

Çizelge 4.3. Ana Malzeme ile Kaplama Sertliklerin Kıyaslanması

Malzeme Adı	Sert Krom Artış Oranı (%)	Akımsız Nikel Artış Oranı (%)	Isıl İşlemlili Akımsız Nikel Artış Oranı (%)
AISI 1020	708	509	744
AISI 301	235	164	280
AISI 321	486	372	588
AISI 4340	334	209	399
AISI 4130	523	356	642

Ana malzemelerin sertlik değerleri baz alındığında AISI 1020 malzemesinin ısıtıl işlem görmüş akımsız nikel kaplı kuponunda %744, AISI 4130 malzemesinde %642 oranında artış görülmüştür. Sert krom kaplanmış kuponlarda ise aynı şekilde AISI 1020 %708, AISI 4130 %523 oranında sertlik değerinde kayda değer artış göstermiştir.

Isıl işlemlili akımsız nikel kaplamaların ortalama değeri 954 HV, sert krom kaplamaların ortalama değeri 812 HV ve akımsız nikel ortalama sertlik değeri 566 HV şeklindedir. Bu durumda ısıtıl işlemlili akımsız nikel kaplamaların, sert kroma göre %13, sert

krom kaplama ise akımsız nikel kaplama kuponlarından yaklaşık %43 daha sert olduğu olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Sert krom kaplı test kuponları üzerinde kaplama sertliği ölçümleri değerlendirildiğinde en düşük sertlik değeri 780 HV iken en yüksek sertlik değeri ise 848 HV olarak ölçülmüş ve ortalama sertlik değeri 811.8 HV olarak bulunmuştur. Bu değerler AMS-2406-N standardına göre sert krom kaplama sertliği minimum 700 HV değerinden az olmamalıdır ifadesini sağlamaktadır.

Akımsız nikel kaplı test kuponları üzerinde kaplama sertliği ölçümleri değerlendirildiğinde, en düşük sertlik 530 HV iken en yüksek sertlik ise 630 HV olarak ölçülmüştür. Kaplamaların ortalama sertlik değeri ise 566.2 HV olarak bulunmuştur. Bu değerler Akımsız nikel kaplamanın mikro sertliği yaklaşık 500-600 HV100 civarındadır ki bu, yaklaşık olarak 48-52 RC'ye eşittir ve pek çok sertleştirilmiş alümin çeliğinin sertliğine eşittir (Atabay, 2011) bilgisini desteklemektedir.

Literatür çalışmalarında akımsız nikel kaplama sertliklerinin ısıtma işlemi uygulanarak iyileştirilebileceği yönündeki bilgilerden hareketle uygulanan ısıtma işlemi sonucu ölçülen sertlikler değerlendirildiğinde ısıtma işlemli akımsız nikel kaplama sertlikleri tüm malzeme gruplarında başarılı bir şekilde artırılmıştır. Literatürde verilen, uygun bir ısıtma işlemi yöntemiyle Ni-P bazlı akımsız nikel kaplamaların sertliği geliştirilebilir. Bu durum amorf fazın kristalleşmesi sırasında çökelen ince Ni kristalitlerine ve sert intermetalik Ni_3P parçacıklarına atfedilebilir (Yan, Ying, & Ma, 2008) ifadesini doğrulamıştır.

4.1.4. Korozyon Testleri

Ana malzemenin korozyon direncini arttırmak kaplama uygulamalarının ana amaçlarından biridir. Uygulanan kaplamanın ana malzemenin korozyon direncine etkisi farklı yöntemlerle değerlendirilebilir. Normal şartlarda uzun süre beklenerek gözlemlenebilecek olan bu durum yapay koroziyon ortamları oluşturularak daha kısa sürelerde

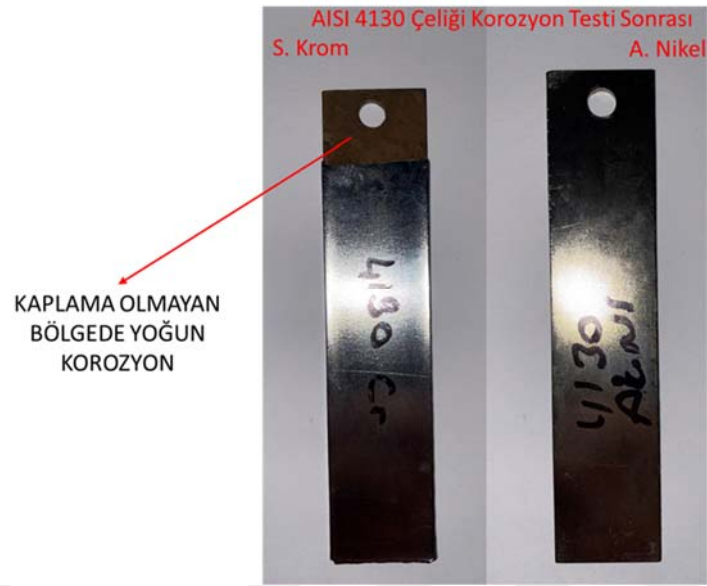
değerlendirilebilir. Bu çalışmamızda ASTM B 117 standardına göre % 5 derişim oranlı tuz çözeltisiyle ve 100 saat süreyle tuz testi uygulanmıştır.

Kaplama işlemlerinin bir diğ er en önemli amaçlarından birisi de korozyon direncinin artmasıdır. Ana malzeme özelliklerine bakıldığında AISI 301 ve AISI 321 malzemeleri aynı grupta bulunan ve malzeme içeriğinde sırasıyla %16,6 ve %19 oranlarında krom elementi bulunduran östenitik paslanmaz çelik malzeme grubuna ait malzemelerdir. Ancak AISI 1020, AISI 4130 ve AISI 4340 çelikleri ise paslanmazlık özelliğ i olmayan çeliklerdir.

Korozyon testi yapılan numuneler incelendiğ inde hem sert krom kaplı hem de akımsız nikel kaplanmış test kuponlarında herhangi bir korozyon izi tespit edilmemiştir. Ancak malzemelerin kaplama olmayan bölgeleri incelendiğ inde paslanmaz çelik sınıfındaki AISI 301 ve AISI321 çeliklerine ait test kuponlarında herhangi korozyon belirtisine rastlanmazken paslanır çelik grubundaki AISI 1020, AISI 4130 çeliklerine ait test kuponlarının kaplama olmayan yüzeylerinde çok yoğun korozyon tespit edilmiştir. Bu durum net bir şekilde ana malzemenin korozyon direncini her iki kaplama yöntemiyle de oldukça etkili bir şekilde iyileştirdiğ ini kanıtlamaktadır. Tuz testi sonrasında kuponların durumu Şekil-4.31' den Şekil-4.35' e kadar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.31. 301 Çeliğ i Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ)



Şekil 4.32. AISI 4130 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ)



Şekil 4.33. AISI 1020 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S. Krom (sol), A. Nikel (Sağ)



Şekil 4.34. AISI 321 Çeliği Korozyon Testi Sonrası Görünüm S.Krom (sol), A.Nikel (Sağ)



Şekil 4.35. AISI 1020(sol), AISI 4130(sağ) Krom Kaplı Numunelerde Korozyon

4.1.5. Aşınma Testleri

Aşınma, malzeme yüzeyinde başka bir malzeme ile hareketinden kaynaklanan sürtünme sonucu oluşan bir hasardır. Aşınmayı tamamen engellemek imkansız olmakla birlikte en aza indirebilmek için çalışmalar yapılmaktadır. Aşınmanın malzeme ve enerji kaybına neden olmasından yüzeylerin aşınmasının sürekli olarak kontrol altında tutulması gerekmektedir (Kılıçay, 2017). Yüzey kaplama teknolojisi ana malzemenin yüzeyini sertleştirerek aşınma direncini arttırmaya ve ana malzemenin dayanıklılığını arttırmaya çalışmaktadır. Aşınma testleri yardımıyla farklı kaplama tipleri arasında değerlendirme yapılabilmektedir. Bu sayede çok daha kısa zamanda pratik sonuçlar alınabilmektedir. Aşınma testleri tribometre cihazı ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada aşınma testleri için farklı malzeme grubunda bulunan ve sertlik değerleri en yüksek çıkan AISI 4340 ve AISI 321 çeliklerine ait kuponlar seçilmiştir. Aynı zamanda bu malzemeler sert krom kaplanmış şekilde havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu iki malzeme grubuna ait ana malzeme, akımsız nikel, sert krom ve ısıt işlem görmüş akımsız nikel kuponlarına aşınma testleri uygulanmıştır. Test sonrası aşınma izleri incelendiğinde aşınma derinlikleri sırasıyla en fazla ana malzeme, akımsız nikel kaplanmış kuponlar, ısıt işlem görmüş akımsız nikel kuponlar ve sert krom kaplamalarda olmuştur. Sert krom kaplamada AISI 321 çeliğinde belli belirsiz izler oluşurken AISI 4340 çeliğinde ise neredeyse hiç iz oluşmamıştır aşınma testi sonrası kaplamalı test kuponlarının görünümü Şekil-4.36, ana metallerin görünümü Şekil-4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.36. Kaplamaların Aşınma Testi Sonrası Görünümleri



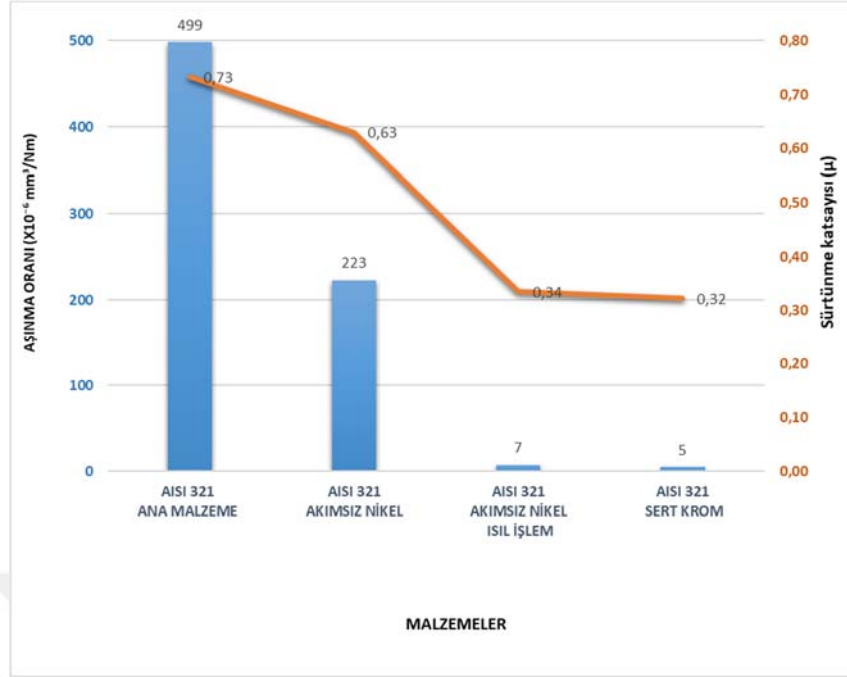
Şekil 4.37. Ana Malzemelerin Aşınma Testi Sonrası Görünümleri

Aşınma testleri iki farklı çelik sınıfına ait test kuponlarından yürütüldüğünden değerlendirme ve karşılaştırmalar kaplama tipleri şeklinde kendi ana malzeme sınıfı içerisinde yapılmıştır.

4.2.5.1. AISI 321 Çeliğine Ait Aşınma Testleri

AISI 321 çelik sınıfına ait kaplamalara uygulanan aşınma testleri sonrası yapılan ölçümler ile oluşturulan aşınma oranı ve sürtünme katsayıları grafiği(Şekil-4.38), incelendiğinde en fazla aşınmanın ana malzemede meydana gelmiştir. Ana malzemeye göre akımsız nikel kaplı numune 2.2 kat, ısıtıl işlem gören akımsız kaplı kupon 71 kat, sert krom kaplı kupon ise 100 kat daha etkili aşınma performansı göstermiştir.

Hesaplanan aşınma oranı ve aşınma cihazından alınan sürtünme katsayılarının karşılaştırılmalı grafiğinde en fazla sürtünme katsayısı ana malzemede, en az sürtünme katsayısı ise sert krom kaplamalı kuponda görülmüştür.



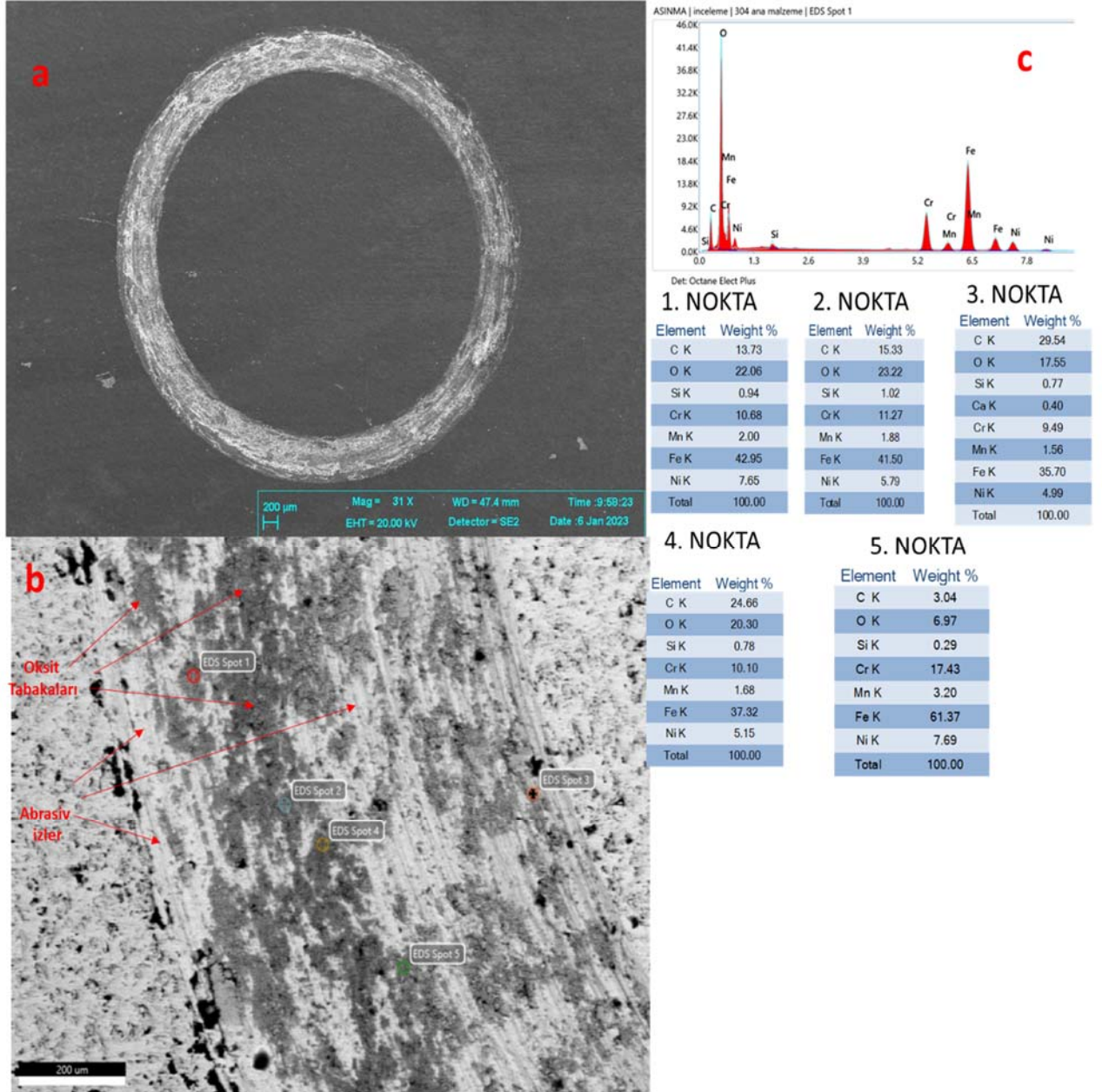
Şekil 4.38.AISI 321 Malzeme Grubuna ait Aşınma oranları ve Sürtünme Katsayıları

Grafik incelendiğinde AISI 321 malzemesinde sert krom kaplama, ısıl işlemlili akımsız nikel test kuponuna göre 1.4 kat daha az aşınmıştır ancak ısıl işlemsiz akımsız nikelere göre aradaki fark 47 kat olduğu düşünülürse ısıl işlem etkisi malzeme yüzeyini aşınma direnci yönüyle çok ciddi bir şekilde arttırmıştır.

AISI 321 Ana Malzeme: Karşılaştırılmalarda referans değer olması açısından üzerinde kaplama bulunmayan ana malzeme üzerinde aşınma testi uygulanmıştır. AISI 321 sınıfı test kuponlarında en fazla aşınmanın ana malzemede olduğu tespit edilmiştir. Ana malzeme üzerinde aşınmanın derinliğinin yaklaşık 40μm değerinde olduğu ölçülmüştür.

AISI 321 ana malzemesinin, SEM incelemesinde(Şekil-4.39b) aşınmaların abrasiv olduğu, spot analizi (EDS) incelemesinde ağırlık oranına göre sırasıyla Fe, O, C, Cr, Ni, Mn, elementlerine rastlanmıştır. Karbon elementi kirlilik olarak değerlendirildiğinden incelemelerde dikkate alınmamıştır. EDS analizinde oksit varlığının tespit edilebilmesi için oksijen oranı yönüyle inceleme yapılmıştır. Diğer elementler ana metalin doğal elementidir.

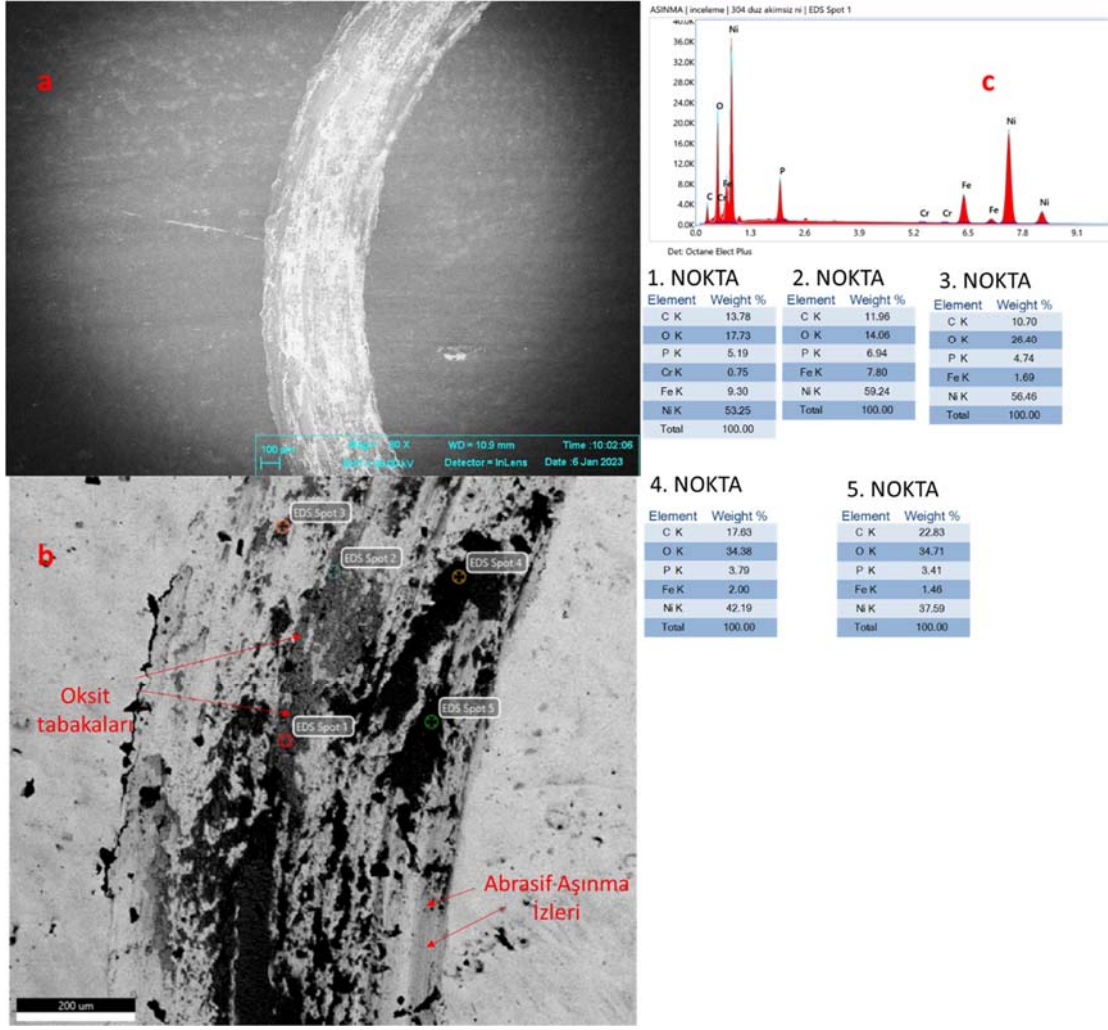
Bu numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde abrasif aşınma izleri ve oksit tabakaları görünmektedir. Bu nedenle aşınma kayıpları sert aşındırıcı kürenin mikro-kazıma ile yüzeyi aşındırması ve tribo-kimyasal reaksiyon sonrası oluşan oksitlerin yüzeyden uzaklaşması ile gerçekleşmiştir (Kılıçay, 2017)



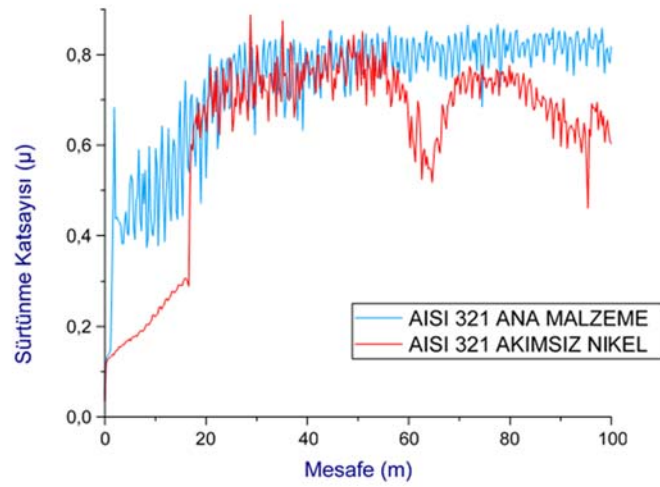
Şekil 4.39. AISI 321 Ana Malzeme a-)Aşınma izi genel, b-)Spot analizi, c-)Element Analizi

AISI 321 ana malzemesinin sürtünme katsayısı ve mesafe grafiği karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla akımsız nikel test kuponu değeriyle aynı grafikte Şekil-4.41' de verilmiştir. Bu grafiğe göre ana malzemenin sürtünme katsayısının 30 metreden sonra kararlı hale geldiği görülmektedir.

AISI 321 Akımsız Nikel Kaplanmış Kupon: Ana malzeme ile karşılaştırıldığında çok bariz bir iyileşme görülse bile kaplanmış numuneler içinde en derin aşınma bu malzemede olduğu görülmüştür. Yapılan ölçümlere göre aşınma kanalının en derin noktası 17-18 μm olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlığına çok yakın olan bu derinlik, aşınma kanalının bazı bölgelerinde ana malzemeye ulaştığının göstergesidir. Aşınma bölgelerinde yoğun bir demir-oksit tabakası oluşmuştur. Oluşan oksit tabakalarının ise Şekil-4.41' de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının 50. ve 70. metreler arasında kararsız hale gelerek azalmasının sebebi olduğu yorumu yapılabilir. AISI 321 malzemesinin akımsız nikel SEM incelemesinde aşınmaların abrasif, aşınmanın aşındırıcı bilyenin mikro-kazıma ile yüzeyi aşındırması ve oluşan oksitlerin yüzeyden uzaklaşması şekliyle gerçekleştiği(Şekil-4.40a,b), spot analizi (EDS) incelemesinde(Şekil-4.40b,c) görülebileceği ağırlıkça en çok Ni, O, C, P, ve Fe elementleri ve 1. Nokta analizinde eser miktarda Cr elementi ile karşılaşılmıştır. Kaplama malzemesi olan nikel ve fosfor doğal olarak yüzeyde bulunmaktadır. Karbon elementi kirlilik olarak değerlendirildiğinden dikkate alınmamıştır. Analizlerde görülen ağırlıkça yaklaşık %10 değerlerine ulaşan Fe ve eser miktarda tespit edilen Cr elementi aşınmanın bazı bölgelerde bir miktar ana malzemeye ulaştığının göstergesi olarak yorumlanmıştır.

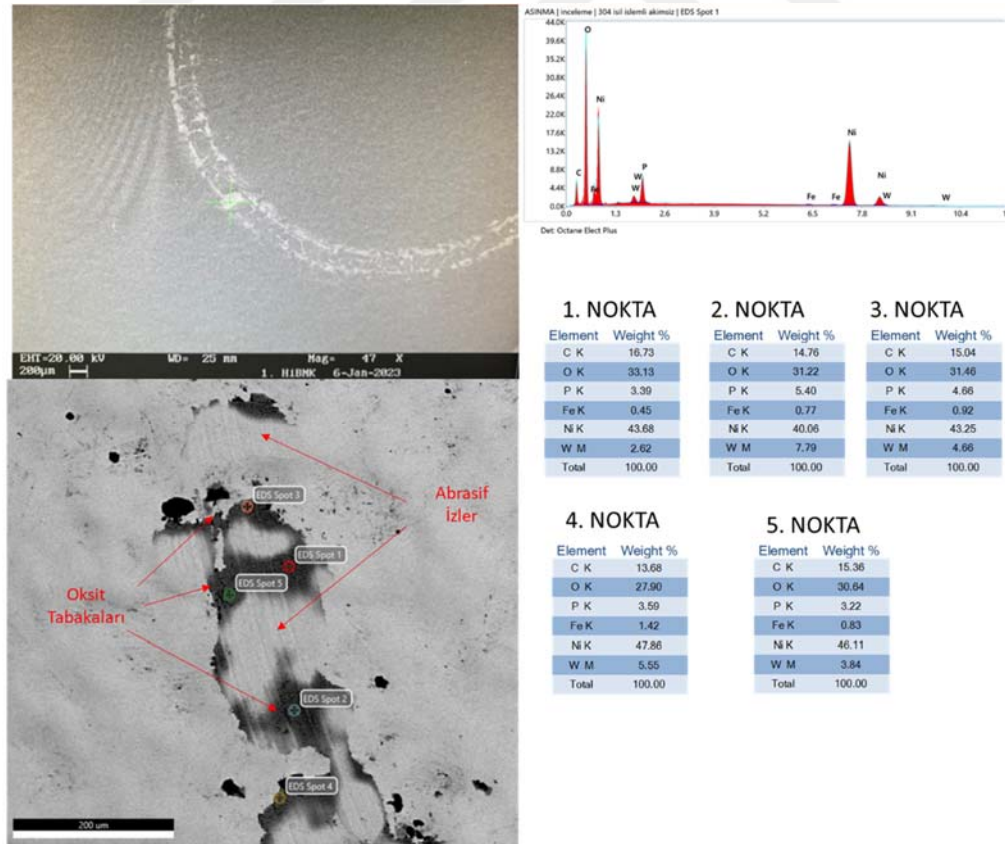


Şekil 4.40. AISI 321 Akımsız Ni a-)Aşınma izi genel, b-)Spot analizi, c-)Element Analizi



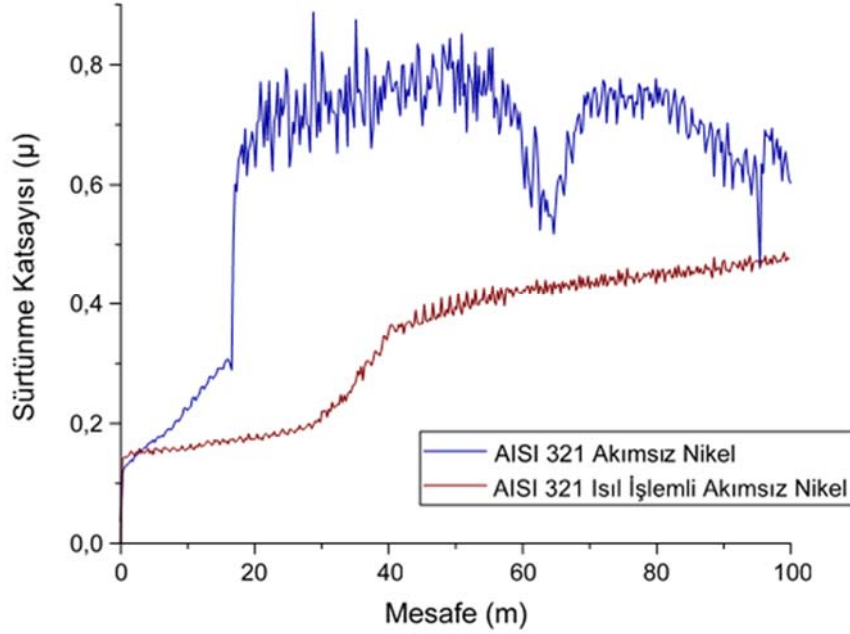
Şekil 4.41. AISI 321 Ana Malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme Katsayısı ve Mesafe Grafiği

AISI 321 Isıl işlemlili Akımsız Nikel Kupon: Akımsız nikel kaplanmış kupon üzerine uygulanan 400 °C sıcaklıkta 1 saat süreli ısıtım işlemi sayesinde sertleşen Ni-P kaplaması ısıtım işlemi görmemiş akımsız nikel kaplamasına göre çok daha iyi aşınma direnci sergilemiştir. Kaplama üzerinde aşınma kanalı oluşsa bile aşınma hacmi ısıtım işlemlisiz test kuponuna göre oldukça düşük kalmıştır. Aşınma derinliği, 4µm olarak ölçülmüştür buda ısıtım işlemlisiz numuneye göre 4 kattan daha fazla bir azalmadır. AISI 321 malzemesinin ısıtım işlemlili akımsız nikel SEM incelemesinde aşınmaların abrasif olduğu(Şekil 4.42b), spot analizi (EDS) incelemesinde(Şekil-4.42b,c), Ni, C, O, P, Fe ve W elementleri görülmektedir. Kaplama malzemesi olan Ni ve P doğal olarak yüzeyde bulunmaktadır. Ayrıca yüzeyde demir ve tungsten oksit tabakalarının oluştuğu da gözlenmiştir. Aşınma direncinin artmasının bir kanıtı olarak yüzeyde ağırlıkça %7 oranına varan karşı aşındırıcı WC bilyeden gelen tungsten elementine rastlanmıştır. Bu durum malzemenin aşınma direncinin yükselmesinin kanıtıdır. Ayrıca yüzeyde eser miktarda karşılaşılan Fe elementi aşınmanın ana malzemeye ulaşmadığı göz önüne alınarak aşındırıcı bilye üzerinden geldiği tahmin edilmektedir.



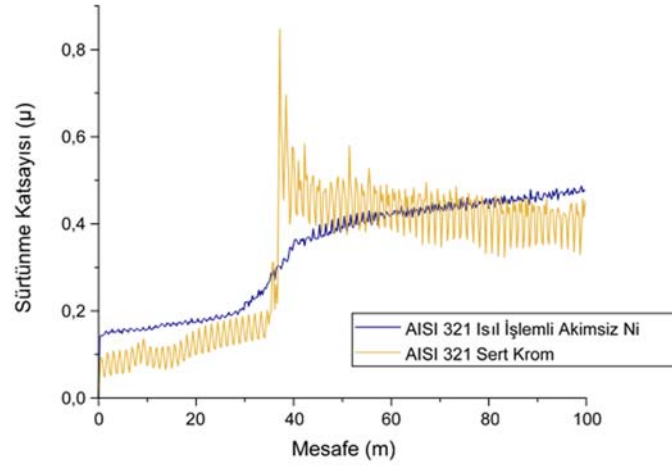
Şekil 4.42. AISI 321 Isıl İşlemlili Akımsız Ni a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi

Sürtünme katsayısı Şekil-4.43 üzerinden incelendiğinde ise 40 metreden sonra daha kararlı hale gelse bile sürtünme katsayısının artışı 100. metreye kadar artışı yavaş bile olsa sürdüğü görülmüştür.

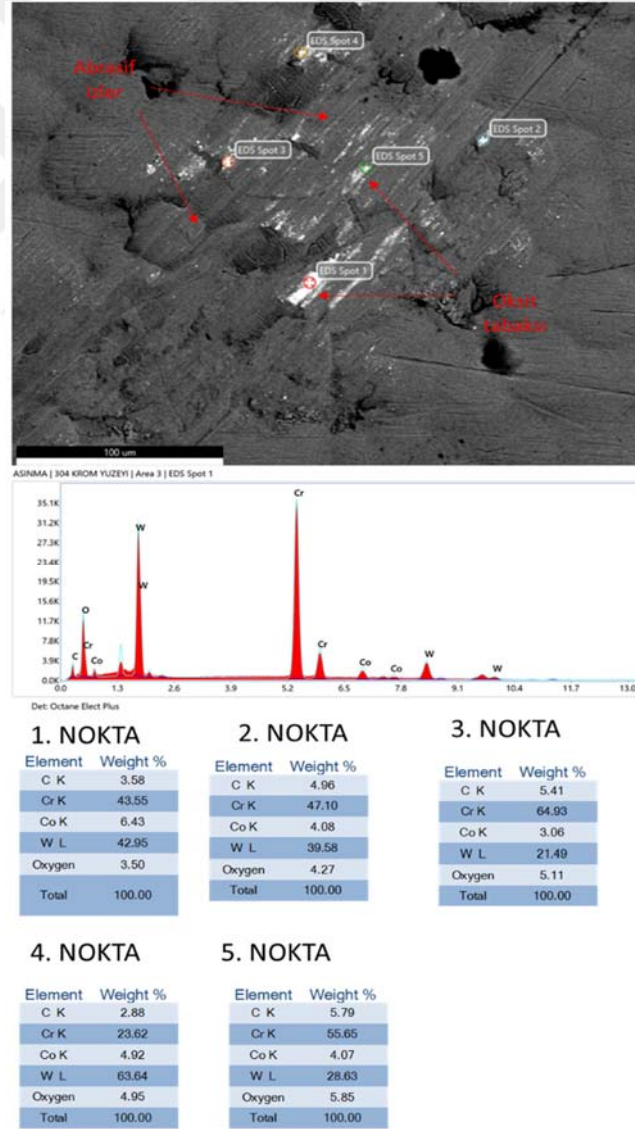


Şekil 4.43. AISI 321 Akımsız Nikel ve Isıl İşlemli Akımsız Nikel Sürtünme Katsayısı ve Mesafe Grafiği

AISI 321 Sert Krom Kaplanmış Kupon: Sert krom kaplanmış kupon AISI 321 sınıfı çeliğine ait kuponlar içerisinde aşınma kanalı en az olan test kuponu olmuştur. Aşınma kanalı derinliği 2.5 μm olarak ölçülmüştür. SEM görüntüsünde (Şekil4.45) aşınma izlerinin diğer kuponlara kıyasla oldukça azaldığı, gözle aşınma kanalı görüntüsü zor tespit edilmektedir. Aşınmanın görülebildiği bazı bölgelerde ve bu bölgelere yapılan spot analizinde(EDS) ise ağırlık oranına göre sırasıyla Cr, W, Co, O, elementlerine rastlanmıştır. W elementi karşı aşındırıcı bilyeden transfer olmuştur ve oranı ağırlıkça %63 gibi çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu durum AISI 321 ana metali üzerindeki sert krom kaplamanın aşınma direncini göstermesi bakımında önemlidir. Aşınma izlerinin(Şekil-4.45) abrasif olduğu, yüzeyde W-oksit tabasının olduğu gözlenmektedir. Karbon elementi kirlilik olarak değerlendirildiğinden dikkate alınmamıştır. Şekil-4.44' da görülebileceği gibi sürtünme katsayısı 40. Metreden sonra daha kararlı hale gelmiştir.



Şekil 4.44. AISI 321 Isıl İşlemli Akımsız Nikel ve Sert Krom Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği

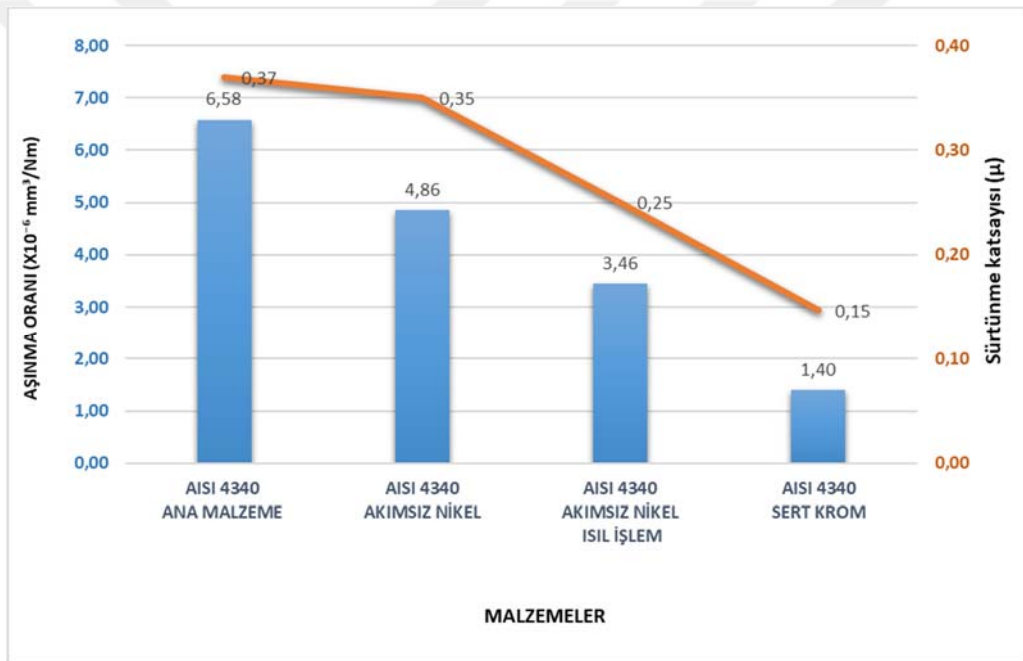


Şekil 4.45. AISI 321 Sert Krom a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi

4.2.5.2. AISI 4340 Çeliğine Ait Aşınma Testleri

AISI 4340 çelik sınıfına ait kaplamalara uygulanan aşınma testlerinde en fazla aşınma ana malzemede meydana gelmiştir. Aşınma oranları incelendiğinde, ana malzemeye göre akımsız nikel kaplı kupon 1.35 kat, ısıl işlem gören akımsız kaplı kupon 1.9, sert krom kaplı kupon ise 4.7 kat daha etkili performans göstermiştir.

Hesaplanan aşınma oranı ve aşınma cihazından alınan sürtünme katsayılarının karşılaştırılmalı grafiği Şekil-4.46' da verilmiştir.

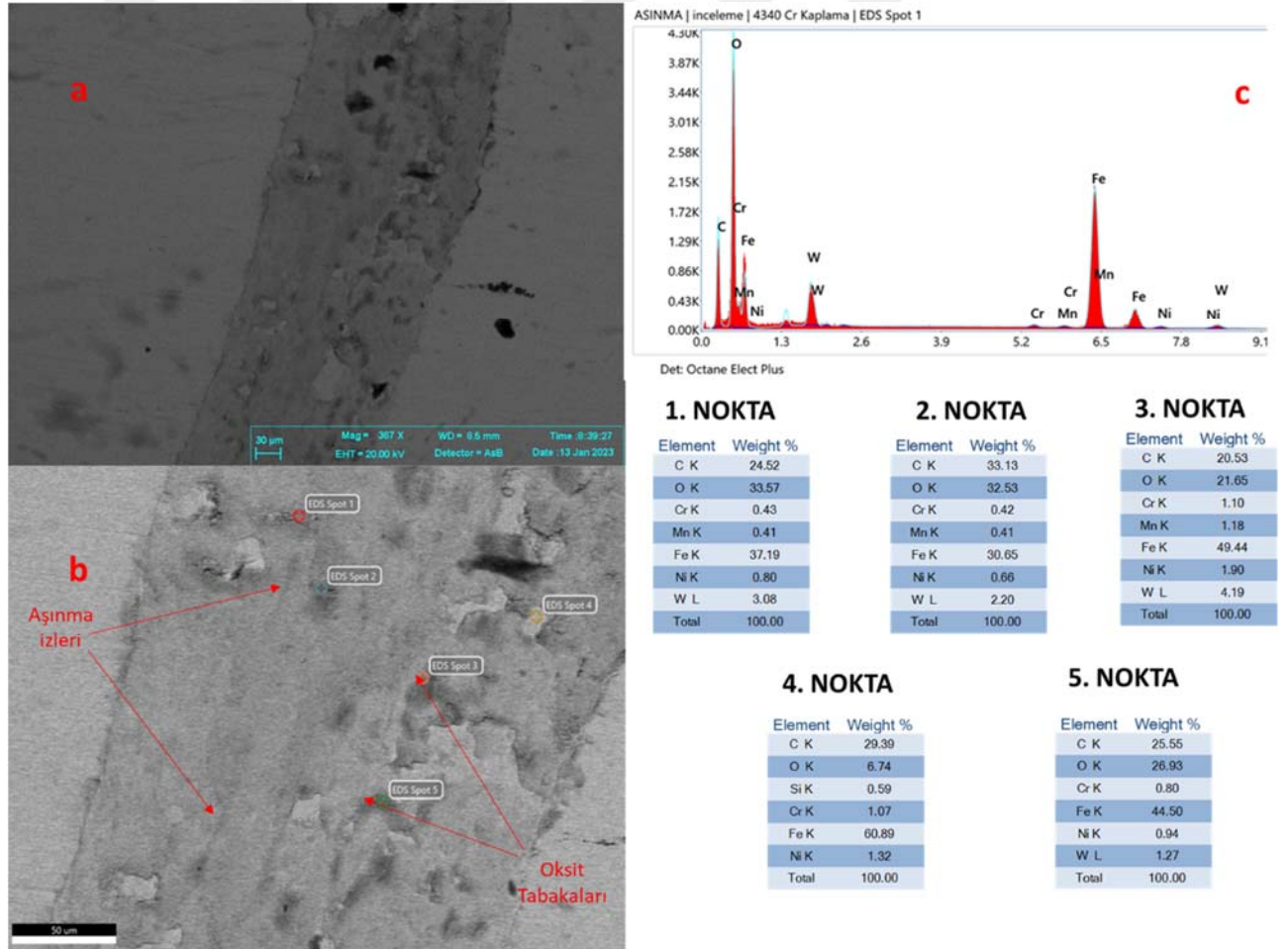


Şekil 4.46. AISI 4340 Malzemesine ait Aşınma oranları ve Sürtünme Katsayıları

Grafik incelendiğinde AISI 4340 malzemesinde, sert krom kaplama test kuponunda en az aşınma oranı görülmüştür. Isıl işlemli akımsız nikel test kuponu, ısıl işlemsiz akımsız nikel kuponuna göre 1,4 kat daha etkili olduğu göz önüne alındığında kaplama üzerine uygulanan ısıl işlem malzeme yüzeyini aşınma direnci yönüyle ciddi bir artış göstermiştir.

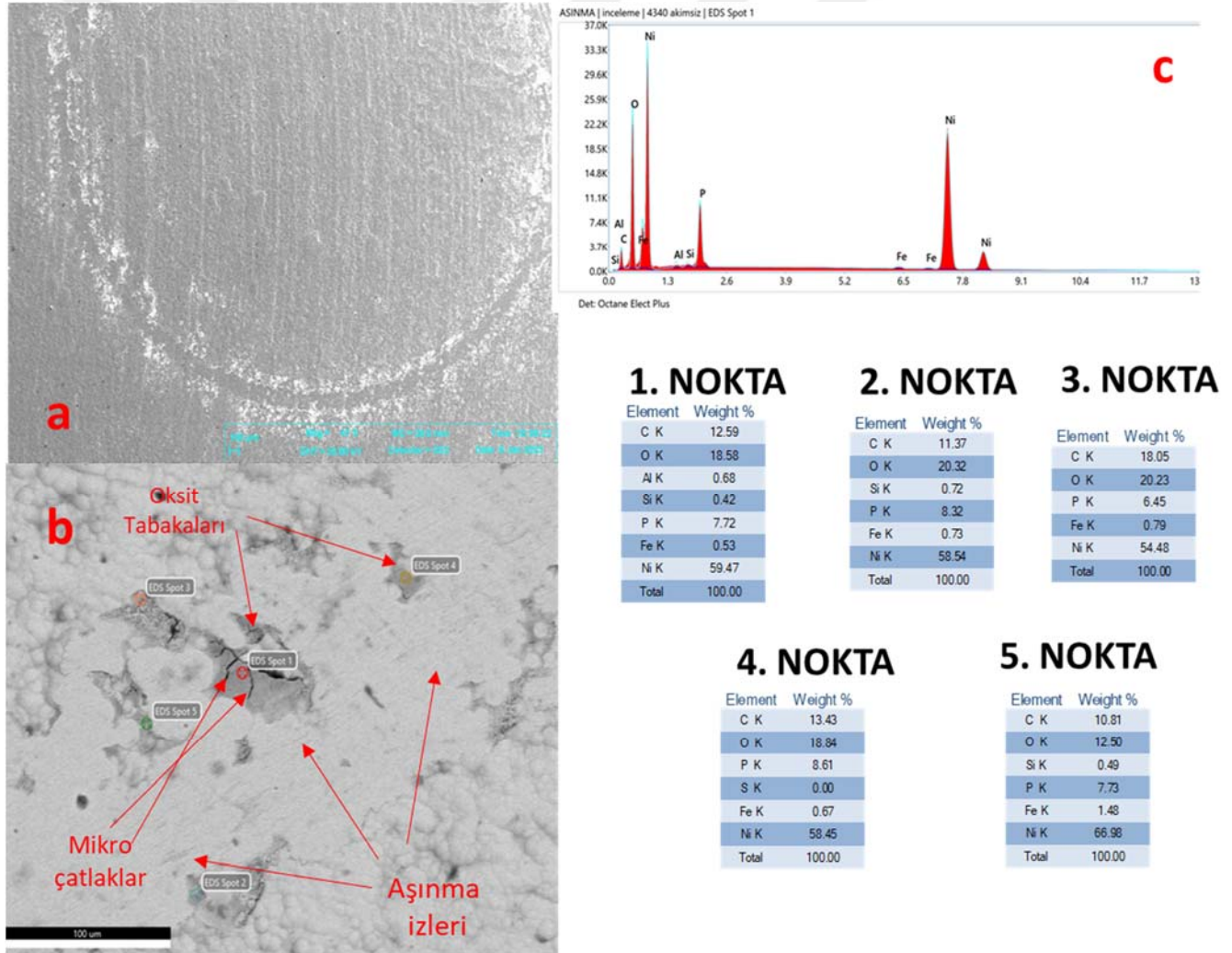
AISI 4340 Ana Malzeme: Karşılaştırılmalarda referans değer olması açısından AISI 4340 ana malzemesinin kaplama olmayan kısmında aşınma testi yürütülmüştür. AISI 4340 malzeme grubuna ait test kuponları içinde en fazla aşınmanın ana malzemede olduğu

görülmüştür. Aşınma kanalı derinliği 5 µm olarak ölçülmüştür. Abrasif aşınma izleri ve oksit tabakaları görünmektedir(Şekil-4.47b). Aşınmaların sert aşındırıcı kürenin mikro-kazıma ile yüzeyi aşındırması ve tribo-kimyasal reaksiyon sonrası oluşan oksitlerin yüzeyden uzaklaşması ile gerçekleşmiştir. Spot analizine(EDS) göre ağırlık oranına göre Fe, O, Cr, C, W, Mn ve Ni, elementlerine rastlanmıştır. Ana malzemenin bileşiminde bulunan Cr, Ni, Mn, Fe elementleri doğal olarak kendisini göstermiştir. Eser miktarda W elementinin test esnasında aşındırıcı WC bilyeden geldiği anlaşılmaktadır. Ayrıca yüzeyde Fe ve W oksit tabakalarının oluştuğu da gözlenmiştir. Bu malzemeye ait sürtünme katsayısı ve mesafe grafiği incelendiğinde(Şekil-4.49) 10. Metreden itibaren kararlı olduğu ancak 70. metrede kararsızlık yaşadığı bunun sebebinin ise yüzeydeki Fe ve W oksitlerinden kaynaklandığı yorumu yapılmıştır.

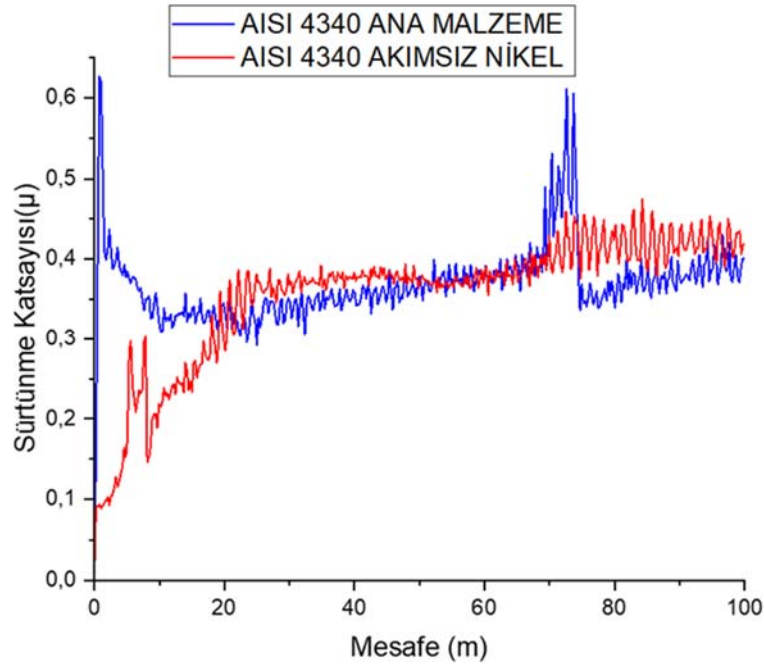


Şekil 4.47. AISI 4340 Ana Malzeme a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi

AISI 4340 akımsız nikel: Akımsız nikel kaplı kupon, ana malzemeye göre aşınma direnci yönüyle daha güçlü olduğu oluşan aşınma kanalının görsel kontrolünde dahi fark edilmektedir. SEM görüntüsünde(Şekil-4.48b), abrasif aşınma izleri fark edilmektedir. Yapılan spot analizi (EDS) incelemesinde(Şekil-4.48c), yüzeyde ağırlıkça Ni, O, C, P ve Fe elementleri ile karşılaşılmıştır. Kaplama yüzeyinde oluşan Fe oksit tabakanın aşınmayı hızlandırdığı yorumu yapılabilir. Spot analiz analizinde ana malzemenin bileşenlerine rastlanmadığından kanalının kaplama üzerinde kaldığı ve ana malzemeye ulaşmadığı anlaşılmıştır. Şekil-4.49 sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde 20. metreden sonra katsayının kararlı hale geldiği görülmektedir.

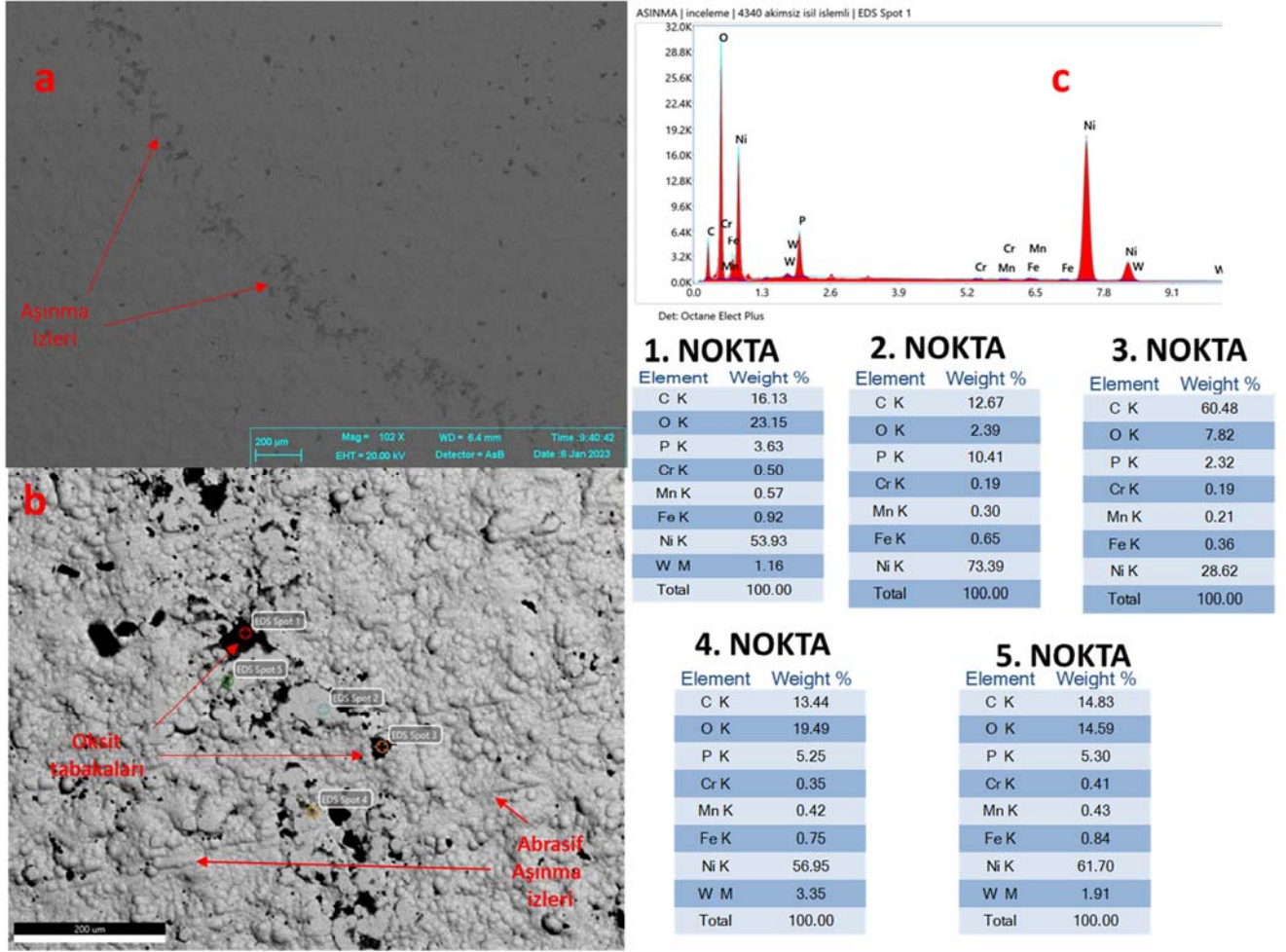


Şekil 4.48. AISI 4340 Akımsız Ni, a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi

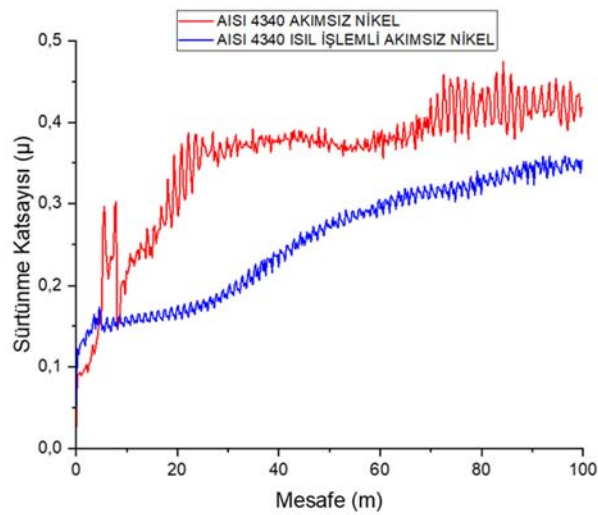


Şekil 4.49. AISI 4340 Ana malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği

AISI 4340 Isıl işlemlili akımsız nikel: Isıl işlem görmüş akımsız nikel test kuponu ile ısıtıl işlem görmemiş akımsız nikel kaplamalara göre gözle görülecek düzeyde aşınma izlerinde iyileştirme göstermiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde(4.50a,b), W oksit ve Fe oksit tabakaları görülmüştür. Yapılan spot(EDS) analizinde(Şekil-4.50c) ise yüzeyde ağırlıkça Ni, O, C, P, W, Fe, Cr, Mn elementleriyle karşılaşılmıştır. Ni ve P kaplamanın kendi malzemeleridir C elementi kirlilik olarak düşünüldüğünden incelemelerde dikkate alınmamıştır. W elementinin ise aşındırıcı WC bilyeden geldiği görülmüştür. Isıl işlem görmeyen akımsız nikel kaplamalarda W elementi olmaması ısıtıl işlemlili kaplamanın ciddi bir aşınma direnci olduğunu göstermektedir. Eser miktarda tespit edilen Mn, Cr ve Fe elementlerinin ağırlıkça oranı çok düşük olduğundan, aşındırıcı bilye üzerinden geldiği değerlendirilmektedir. Şekil-4.51’de sürtünme katsayısı-mesafe grafiği incelendiğinde aşınmanın tam olarak başlamadığı ve bu sebeple kararlı hale gelemediği onun yerine doğrusala yakın bir şekilde 100. metreye kadar artış gösterdiği yorumu yapılabilir.

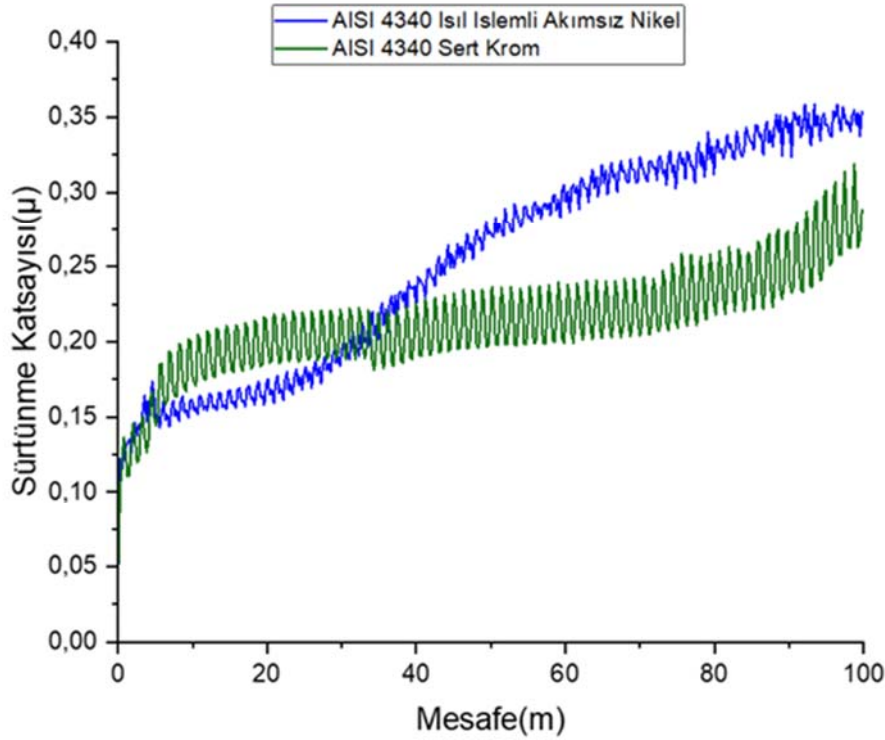


Şekil 4.50. AISI 4340 Isıl İşlemli Akımsız Ni, a-) Aşınma izi genel, b-) Spot analizi, c-) Element Analizi

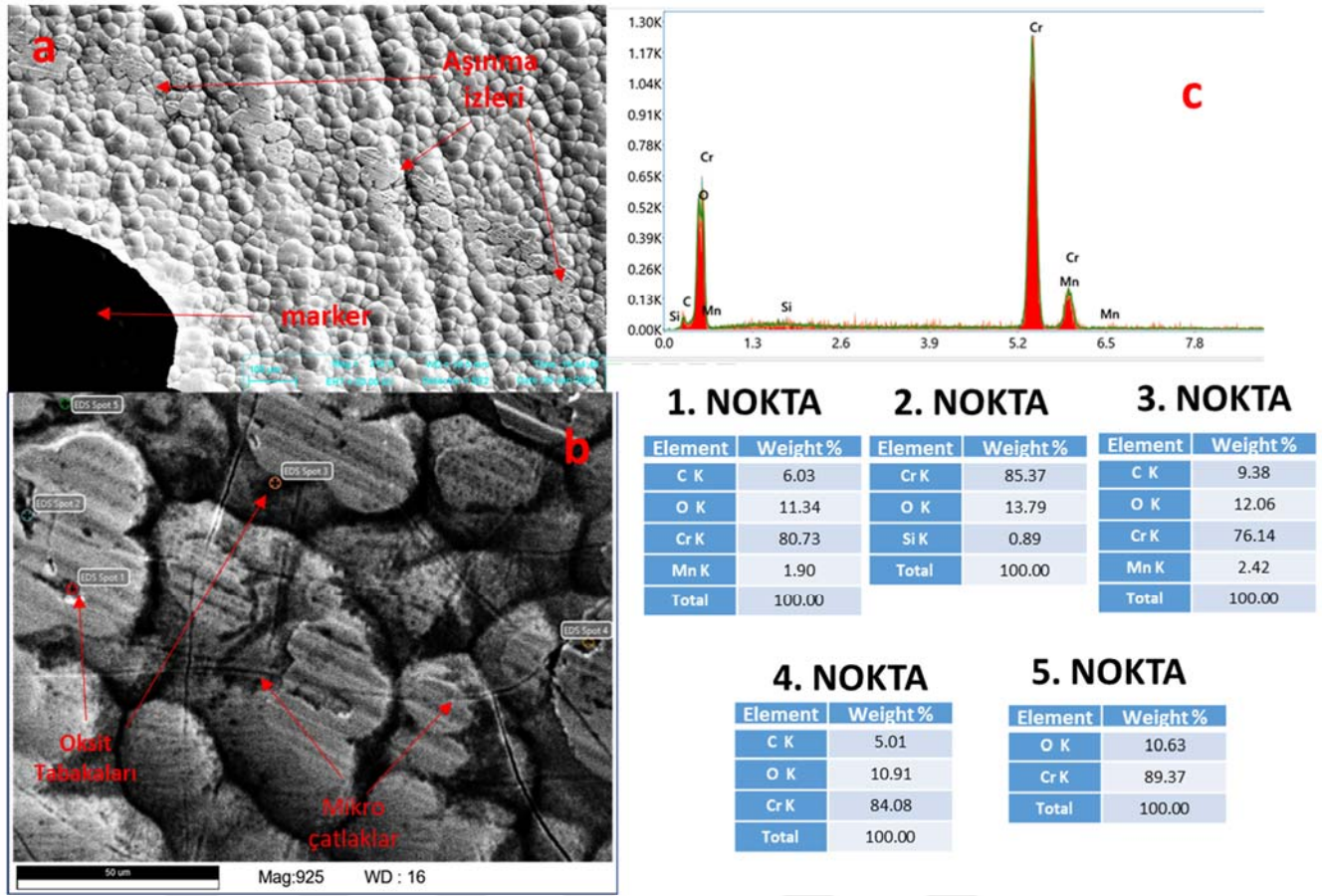


Şekil 4.51. AISI 4340 Akımsız Nikel ve Isıl İşlemli Akımsız nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği

AISI 4340 Sert Krom: AISI 4340 malzemesine ait sert krom kaplanmış test kuponu aşınma testi sonrasında aşınma gözle görünemeyecek düzeyde gerçekleşmiştir. Test kuponuna ait SEM görüntüsüyle tespit edilebilen aşınma kanalının görüntüleri Şekil 4.53’ de abrasif aşınma izleri ezilme şeklinde görülmektedir. Yürütülen element analizinde ise ağırlıkça sırasıyla Cr, O, C, Si, ve Mn görülmektedir. Yüzeyde sadece kaplama elementi olan Cr elementine oldukça baskındır(Şekil-4.53c). Yapılan spot analizinde krom-oksit tabakaları yoğundur(Şekil-4.53b). Aşınma cihazından gelen veriler grafiğe döküldüğünde(Şekil 4.52), sürtünme katsayısı çok düşük çıkmıştır. Böylece yapılan tüm aşınma testlerinde AISI 4340 sert krom kaplı test kuponu en iyi aşınma direnci gösteren test kuponu olmuştur.



Şekil 4.52. AISI 4340 Ana malzeme ve Akımsız Nikel Sürtünme katsayısı Mesafe Grafiği



Şekil 4.53. AISI 4340 Sert krom, a-)genel görüntü, b-)yakın görüntü, c-)element analizi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık endüstrisinde kullanılan sert krom kaplamalar ile akımsız nikel kaplamaların tribolojik performanslarının karşılaştırıldığı deneysel çalışmamız da elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Her iki kaplamanın da ana malzemenin sertliğini, korozyon direncini, aşınma direncini etkili bir şekilde arttırdığı kanıtlanmıştır. Ancak sert krom kaplamaların insan sağlığı ve çevreye zararlı etkileri nedeniyle büyük bir dezavantajı bulunmaktadır.
- Yüksek mukavemetli çelik parçaların krom kaplanmasında hidrojen kırılabilirliği ciddi bir endişe kaynağıdır. Hidrojen işlem sırasında kaplama içerisinde mikro çatlaklar oluşturabilmektedir. Akımsız nikel kaplamalar ise daha az gözenekli bir tabaka oluşturduğundan mikro çatlak oluşumu sert krom kaplamalara göre çok daha azdır.
- Havacılık endüstrisindeki kaplamalarda sertlik, aşınma ve korozyon direnci en önemli anahtar performanslardır. Bu konularda akımsız nikel kaplamalar havacılık endüstrisinin minimum gerekliliklerini sağlamaktadır.
- Havacılık endüstrisinde sert krom kaplama için minimum sertlik gereksinimi 700-900 HV arasında olması istenmektedir, ısıtma işlemi görmeyen akımsız nikel bazı özel uygulamalarda kullanılsa da istenen sertlik değerini karşılayamazlar. Isıtma işlemi uygulanan akımsız nikel kaplamalar ise 1000 HV sertlik değerlerine ulaşabilirler.
- 100 saatlik korozyon test sonuçlarına göre hem sert krom kaplama hem de akımsız nikel kaplamalar başarılı sonuçlar elde etmiştir. Literatüre göre sert krom kaplamalar akımsız nikel kaplamalara göre daha yüksek korozyon direncine sahip olsalar da çoğu zaman akımsız nikel kaplamaların korozyon direncinin de yeterli olduğu kabul edilmektedir.
- Kaplama kalınlığına göre bir değerlendirme yapıldığında literatürde verilen bilgilere göre akımsız nikel kaplamalar en çok 100 µm kalınlığa ulaşabilmektedir. Sert krom kaplamalar ise bundan çok daha fazla kalınlığa ulaşabilmektedir. Standartlarda verilen birçok uygulama noktasında yeterli kabul edilen minimum 50 µm kalınlık referans alındığında akımsız nikel kaplamaların bu değerler için kabul edilebilir

olduğu söylenebilir. Ancak tamir uygulamalarında yüksek tekrarlanabilirliği sebebiyle sert kromun tamir işlemlerine daha uygun olduğu yorumu yapılabilir.

- Kaplanan ana malzemenin geometrisine düşünüldüğünde, karmaşık geometriye sahip parçaların kaplanması akımsız nikel bir otokatalitik kaplama olması sebebiyle zor alanlarda bile homojen kalınlığını (uniformluk) sağlayabilmektedir. Bu durum sert krom kaplamalara göre bir avantaj sağlamaktadır.
- Kaplamaların aşınma performansları incelendiğinde, sert krom kaplamanın daha iyi aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak ısıtma işlemi uygulanmış akımsız nikel kaplamalarında aşınma dirençlerinde çok ciddi artışlar tespit edilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde ısıtma işlemi gören akımsız nikel test kuponlarının aşınma performanslarının sert krom kaplamalara oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak sert krom kaplamalar, genel olarak aşınma direnci bakımından akımsız nikel görece daha önde olduğu hem literatür hem de yapılan deneysel çalışmamızda görülmüştür. Bu sebeple akımsız nikel kaplamaların sert krom kaplamalara tam olarak alternatif olabileceği söylenemez. Buna rağmen havacılık endüstrisinde akımsız nikel kaplamalar niş uygulama alanlarında zaten kullanılmaktadır. Ancak yapılan testler göstermiştir ki akımsız nikel kaplamaların ısıtma işlemiyle sertlik ve aşınma direnci muazzam şekilde arttırabilmiştir. Bu durumda doğru altlık malzeme seçilerek akımsız nikel kaplamaların, hava araçlarının yağ ve hidrolik ünitelerinin korozyon yönüyle daha korunaklı kabul edilen iç aksamalarında sert kroma alternatif olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. İniş takımları ve hidrolik silindir pistonları gibi yüksek korozif ve aşınma direnci isteyen yerlerde kullanılabilirliğinin söylenebilmesi için ise daha kapsamlı testlerin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Atabay, E. N. (2011). Doktora Tezi. *Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi*. Eskişehir : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Buchtík, M., Krystýnová, J. M., & Másilko, J. (2019). The Effect of heat Treatment on Properties of Ni-P Coatings Deposited on AZ91 Magnesium Alloy. *Coatings* 9, 461-470.
- Checkline. (2022, Aralık). *MiniTest 600*. checkline.com: <https://www.checkline.com/product/MiniTest-600> adresinden alındı
- Cotell, C., Sprague, J., & Smid, F. (1994). *Volume 5 of the ASM Handbook*. ASM International Handbook Committee.
- Çapkın, M. S. (2014). Yüksek Lisans Tezi. *Akımsız Kaplama Tekniği Kullanılarak ASTM A105 Kalitede Çeliğin Nikel Kaplanması Mikro Yapısına, Korozyon Direncine ve Sertliğine Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi*. Bilecik: Anadolu ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversiteleri Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Devereaux, J. L. (2004). *HVOF as a Hard Chrome Replacement*. Jacksonville: USA-Naval Air Depot Jacksonville.
- El-Amoush, J. A., & vd. (2011). Tribological properties of hard chromium coated 1010 mild steel under different. *Solid State Sciences* 13, 529-533.
- Equipment, P. T. (2022, Aralık). *Coating Thickness Meter*. paint-test-equipment.co.uk: <https://paint-test-equipment.co.uk/wp-content/uploads/2021/06/Coating-Thickness-Meter-1.pdf?v=ebe021079e5a> adresinden alındı
- Eriksson, M. (2014, Aralık 23). Sliding wear performance of electroplated hard chromium and autocatalytic nickel-phosphorus coatings at elevated temperatures. *Karlstads University The Faculty of Health, Science and Technology, Master Thesis*,. Karlstad, İsveç.
- Figert, J. (2020, Mayıs). PRC-5007 Rev. E. *Process Specification for Electroless*. Houston, Texas, Amerika Birleşik Devletleri: NASA-National Aeronautics and Space Administration.
- Handbook Committee. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys Volume I*. Ohio: ASM International.
- Jimmie Barnett, D. B. (2008, Kasım 21). MIL-STD-810G-Department of Defense Test Method Standard. *Environmental Engineering Consideration and Laboratory Tests*. Amerika Birleşik Devletleri: Department of Defense of USA.
- Kılıçay, K. (2017, Ocak). Doktora Tezi. *Mikroalaşımlı 38MnVS6 Çeliğine Uygulanan Farklı Yüzey ve Isıl İşlemlerin Mekanik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması*. Eskişehir, Türkiye .

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Küpeli, G., & vd. (2008). Akımsız Ni P Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüzey İşlemler Dergisi, cilt.1*, 60-66.
- Legg, K. (2002). Overview of Chromium and Cadmium Alternative. *Surface Modification Technologies XV*.
- MatWeb. (2022, Aralık). *MatWeb Material Property Data*. [www.matweb.com: https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e2147b8f727343b0b0d51efe02a6127e&ckck=1](http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e2147b8f727343b0b0d51efe02a6127e&ckck=1) adresinden alındı
- Mcguire, M. (2008). *Stainless Steel for Design Engineers*. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International.
- Numune Hazırlama Teknikleri-Ders Notları. (2022, Aralık). [cdn.bartın.edu.tr: https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/4.-numune-hazirlama-teknikleri.pdf](https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/4.-numune-hazirlama-teknikleri.pdf) adresinden alındı
- Parkinson, R. (2001). *Properties and applications of electroless nickel*. Nickel Development Institute.
- SAE. (2015, Ocak). AMS2406. *Plating, Chromium Hard Deposit*. Amerika Birleşik Devletleri: Society of American Engineers.
- SAE. (2015, Temmuz). AMS-QQ-N-290. *Nickel Plating (Electrodeposited)*. Amerika Birleşik Devletleri: Society of American Engineers.
- Sudagar, J., & vd. (2013). Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 183-204.
- Svenson, E. (2006). *DuraChrome Hard Chromium Plating*. Florida: Plating Resources, INC Surface Finishing Technology.
- Teknolab. (2022, Aralık). *Teknolab*. [/www.teknolab.info: https://www.teknolab.info/hizmetler/tuz-korozyon-testi](https://www.teknolab.info/hizmetler/tuz-korozyon-testi) adresinden alındı
- Wikipedia. (2022, Aralık 27). *Taramalı elektron mikroskopu*. [tr.wikipedia.org: https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramalı_elektron_mikroskopu](https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramalı_elektron_mikroskopu) adresinden alındı
- Wikipedia. (2022, Aralık). *Landing Gear*. [wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Landing_gear](https://en.wikipedia.org/wiki/Landing_gear) adresinden alındı
- William D. Callister, J. G. (2014). *Materials Science and Engineering 9th Edition*. Danvers, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc.
- Williams, N. (1996). A survey of respiratory and dermatological disease in the chrome plating industry in the West Midlands, UK. *Occup. Med. Vol. 46*, 432-434.
- Yan, M., Ying, H., & Ma, T. (2008). Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni–P coating. *Surface and Coatings Technology*, 5909-5913.