



**HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILMAK ÜZERE ALÜMİNYUM
MALZEMELERİN KOROZYON DİRENCİNİN ARTTIRILMASI
AMACIYLA YÜZEY KAPLAMASI GELİŞTİRİLMESİ**

Burhan GÜVEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burhan GÜVEN

09/06/2022

HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILMAK ÜZERE ALÜMİNYUM
MALZEMELERİN KOROZYON DİRENCİNİN ARTTIRILMASI AMACIYLA YÜZEY
KAPLAMASI GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Burhan GÜVEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, alaşım ilavesinden (örneğin, Cu, Fe vb.) kaynaklanan arzu edilen mukavemet / ağırlık oranları nedeniyle havacılık ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu alaşım ilavesi, intermetalik çökrekleri çevreleyen alüminyumun oyuk korozyonuna neden olur. Korozyonu önlemenin etkili bir yolu, üst kaplama, astar ve dönüştürme kaplamasını içeren koruyucu kaplama sistemidir. Dönüşüm kaplaması, alaşım yüzeyiyle doğrudan temas halindedir ve hem korozyona karşı iyi bir koruma hem de yapışma yüzeyi sağlaması beklenir. Kromat dönüşüm kaplaması (CCC), havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve mükemmel aktif korozyon koruması ve alüminyum alaşımlarına yapışma sağlar. Ne yazık ki, Cr (VI) toksiktir ve kromat bir kanserojendir. Bu nedenle, CCC'nin yerine üç değerlikli krom proses kaplaması (TCP) ve krom içermeyen kaplamalar geliştirilmektedir. Bu tez, üç yüksek mukavemetli alüminyum alaşımında (2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6) TCP kaplama (Cr (III) içerikli) ve silan kaplamanın korozyona karşı direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı incelenerek günümüzde yaygın olarak kullanılan Cr içeren CCC ile karşılaştırılmıştır. Bu performans parametreleri MIL-DTL-5541/81706 standardında belirtilen metotlar ile gerçekleştirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca TCP, silan kaplama ve CCC yapılan 2024-T3 alaşımlarının yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek kaplama yapılmamış paneller ile karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda TCP kaplama (Cr (III) içerikli), CCC'nin diğer Cr içermeyen alternatifi silan içerikli dönüşüm kaplamalarıyla karşılaştırıldığında daha iyi korozyon koruması sağladığı görülmüştür. TCP kaplamasının korozyon performansı silan kaplamalar ile kıyaslandığında üç alüminyum alaşımında da iyi bir korozyon koruması sağlamıştır.

Bilim Kodu : 91213
Anahtar Kelimeler : Kimyasal yüzey işlem, metalik yüzey kaplama, kimyasal dönüşüm kaplaması, korozyon, krom içermeyen kaplama, silan
Sayfa Adedi : 118
Danışman : Prof. Dr. Nursel DİLSİZ

DEVELOPMENT OF SURFACE COATING TO INCREASE THE CORROSION
RESISTANCE OF ALUMINUM MATERIALS TO BE USED IN THE AVIATION
INDUSTRY

(M. Sc. Thesis)

Burhan GÜVEN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

High strength aluminum alloys are widely used in aviation and aerospace industries because of their desirable strength/weight ratio that results from the alloy addition (e.g., Cu, Fe etc). However, this alloy addition causes pitting corrosion of the aluminum surrounding those intermetallic contents. An effective way to prevent corrosion is a protective coating system that includes topcoat, primer and conversion coat. The conversion coating is in direct contact with the alloy surface and is expected to provide both good corrosion protection and an adhesion surface. The chromate conversion coating (CCC) has been widely used in aviation/aerospace industry and provides excellent active corrosion protection and adhesion to aluminum alloys. Unfortunately, the Cr(VI) is toxic and chromate is a carcinogen. Therefore, trivalent chromium process coating (TCP) and chrome-free coatings are being developed to replace CCC. In this thesis, compared with today's widely used Cr containing CCC, the corrosion resistance, coating thickness, resistance to electrical conductivity and paint adhesion performance of TCP coating (Cr (III) content) and chromium-free coating on three high strength aluminum alloys (2024-T3, 6061-T6 and 7075-T6) were investigated. These performance parameters were compared with the methods specified in the MIL-DTL-5541/81706 standard. In addition, the surfaces of 2024-T3 alloys coated with TCP, chromium-free coating and CCC were examined with a scanning electron microscope (SEM) and compared with uncoated panels. As a result of the tests, it was seen that TCP coating (Cr (III) content) provides better corrosion protection compared to CCC's other Cr-free alternative silane-containing conversion coatings. The corrosion performance of the TCP coating provided good corrosion protection for all three aluminum alloys when compared to chromium-free coatings.

ScienceCode	: 91213
KeyWords	: Chemical surface treatment, metallic surface coating, chemical conversion coating, corrosion, chrome free coating, silane
PageNumber	: 118
Supervisor	: Prof. Dr. Nursel DİLSİZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Nursel DİLSİZ'e bilgi ve tecrübelerini benimle paylaştığı için en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Türk Havacılık ve Uzay Sanayi çalışanı tüm ekip arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan her zaman yanımda olan ve beni destekleyen sevgili eşim Büşra GÜVEN'e attığım her adımda yanımda olduğu için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. HAVACILIKTA KULLANILAN MALZEMELERİN SEÇİMİ	3
3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	7
3.1. Alüminyum'un Tarihçesi	7
3.2. Alüminyum'un Özellikleri	7
3.3. Alüminyum'un Doğada Bulunuşu	8
3.4. Alüminyum'un Eldesi	9
3.5. Alüminyum Kullanımının Endüstrilere Göre Gruplandırılması	9
4. HAVACILIKTA KULLANILAN ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	11
4.1. İşlem Alüminyum Alaşımları.....	12
4.1.1. Havacılıkta en çok kullanılan işlenebilir alüminyum alaşımları[7]	13
4.2. Alüminyum Alaşımları İçin Isıl İşlem Kondisyon Göstergeleri	18
5. ALÜMİNYUM KOROZYONU VE ÇEŞİTLERİ.....	23
5.1. Alüminyum Korozyonunun Elektrokimyasal Temeli	23
5.1.1. Alüminyumun çözünme potansiyeli	27
5.2. Alüminyum ve Alaşımlarında Görülen Korozyon Çeşitleri	30

	Sayfa
5.2.1. Üniform korozyon.....	31
5.2.2. Oyuklanma (pitting) korozyonu.....	31
5.2.3. Tanelerarası ve tane içi korozyon	34
5.2.4. Tabakalaşma korozyonu.....	37
5.2.5. Gerilmeli korozyon	37
5.2.6. Kurtçuk korozyonu.....	40
5.2.7. Aralık korozyonu	41
5.2.8. Erozyon	42
5.2.9. Mikrobiyolojik korozyon	42
5.2.10. Galvanik korozyon.....	43
6. UÇAKLARDA KOROZYONDAN KORUNMA VE ÖNLENMESİ ...	45
6.1. Uçaklarda Korozyona Neden Olan Faktörler.....	49
6.2. Korozyon Kontrol Yöntemleri	51
6.2.1. Malzeme seçimi	52
6.2.2. Kaplama seçimi.....	52
6.3. Alüminyum Yüzey Kaplama İşlem Basamakları (Proses Adımları)	59
6.3.1. Yüzey hazırlama.....	60
7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	63
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
8.1. Çözelti Hazırlama.....	70
8.1.1. Alkali temizleme	70
8.1.2. Asitle temizleme (Deoksidasyon)	71
8.1.3. Kimyasal dönüşüm kaplamaları.....	72
8.2. Numune Hazırlama	75
8.2.1. Test kuponu hazırlama	75
8.2.2. Test kuponu kaplama	76

	Sayfa
8.3. Performans Testleri	78
8.3.1. Korozyon direnci testi	78
8.3.2. Boya yapışma testi	79
8.3.3. Elektriksel temas direnci testi	81
8.3.4. Kaplama ağırlığı.....	83
8.3.5. Karakterizasyon.....	84
9. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	87
9.1. Korozyon Direnci Testi Sonuçları	87
9.2. Boya Yapışma Testi Sonuçları.....	91
9.3. Elektriksel Direnç Testi Sonuçları	96
9.4. Kaplama Ağırlığı Sonuçları	99
9.5. SEM Sonuçları	102
10. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	109
EKLER.....	115
EK-1. Korozyon Direnci Test Sonuçları.....	116
EK-2. Boya Yapışma Testi Test Sonuçları	117
ÖZGEÇMİŞ	118

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılma dizgesi.....	12
Çizelge 4.2. 2024 alaşımının kimyasal bileşenleri	13
Çizelge 4.3. 2024 alaşımının fiziksel özellikleri	13
Çizelge 4.4. 2024 alaşımının ısı işlemleri	13
Çizelge 4.5. 2024 alaşımının mekanik özellikleri	14
Çizelge 4.6. Kaplı 2024 alaşımının mekanik özellikleri	14
Çizelge 4.7. 6061 alaşımının kimyasal bileşenleri	15
Çizelge 4.8. 6061 alaşımının fiziksel özellikleri	15
Çizelge 4.9. 6061 alaşımının ısı işlemleri	15
Çizelge 4.10. 6061 alaşımının mekanik özellikleri	16
Çizelge 4.11. 7075 alaşımının kimyasal bileşenleri	16
Çizelge 4.12. 7074 alaşımının fiziksel özellikleri	17
Çizelge 4.13. 7075 alaşımının ısı işlemleri	17
Çizelge 4.14. 7075 alaşımının mekanik özellikleri	17
Çizelge 4.15. Alüminyum alaşımlarının uçaklardaki genel kullanım yerleri.....	22
Çizelge 5.1. Alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyeli (NaCl çözeltisinde, H ₂ O ₂ , ASTM G69).....	28
Çizelge 5.2. İntermetalik fazların çözünme potansiyeli (NaCl çözeltisinde, H ₂ O ₂ , ASTM G69).....	29
Çizelge 5.3. Katı eriyik ve intermetalik fazların çözünme potansiyeli (NaCl+H ₂ O ₂ çözeltisinde)	35
Çizelge 8.1. Alkali temizleme banyosu içeriği ve çalışma şartları.....	71
Çizelge 8.2. Asitle temizleme banyosu içeriği ve çalışma şartları.....	71
Çizelge 8.3. Dönüşüm banyosu içeriği ve çalışma şartları.....	72
Çizelge 8.4. Pasivasyon banyosu içeriği ve çalışma şartları	73
Çizelge 8.5. Silan kaplama banyosu içeriği ve çalışma şartları	74

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.6. Krom VI içeren kaplama banyosu içeriği ve çalışma şartları	75
Çizelge 8.7. Test matrisi	75
Çizelge 8.8. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları	76
Çizelge 8.9. Silan kaplaması işlem basamakları	77
Çizelge 8.10. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları	77
Çizelge 8.11. Boya yapışma testi sonrası panel değerlendirme çizelgesi	80
Çizelge 9.1. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması korozyon direnci test sonuçları.	87
Çizelge 9.2. Silan kaplaması korozyon direnci test sonuçları	88
Çizelge 9.3. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması korozyon direnci test sonuçları.	89
Çizelge 9.4. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları.....	91
Çizelge 9.5. Silan kaplaması boya yapışma testi sonuçları	93
Çizelge 9.6. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları.....	93
Çizelge 9.7. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)	94
Çizelge 9.8. Silan kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)	95
Çizelge 9.9. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)	95
Çizelge 9.10. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları	97
Çizelge 9.11. Silan kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları	98
Çizelge 9.12. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları	98
Çizelge 9.13. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları	100
Çizelge 9.14. Silan kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları	101
Çizelge 9.15. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları	101
Çizelge 9.16. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabinde bekledikten sonraki SEM görüntüleri	102

Çizelge	Sayfa
Çizelge 9.17. Silan kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabinde bekledikten sonraki SEM görüntüleri	103
Çizelge 9.18. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabinde bekledikten sonraki SEM görüntüleri	103

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Metal-çözelti ara yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyonlar; a) Metal atom okside olur ve oluşan Mn^{+} iyonları sulu faza geçer. b) Sulu fazda iyonlar ve moleküller indirgenir. Metalden elektron alarak diğer kimyasal türlere dönüşürler	24
Şekil 5.2. Alüminyumun çözünme potansiyeline alaşım elementlerinin etkisi	27
Şekil 5.3. Yaşlandırma süresinin 2014 ve 7075 alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyeline etkisi.....	29
Şekil 5.4. Alüminyumun oyuklanma korozyonunun mekanizması	34
Şekil 5.5. Tane sınırlarında katodik fazın çökmesi	36
Şekil 5.6. Gerilmeli korozyon çatlağı, elektrokimyasal ilerleme	39
Şekil 5.7. Airbus A320 uçağının gövde üstündeki kurtçuk korozyonu	41
Şekil 5.8. Aralık korozyonu	42
Şekil 6.1. Alüminyum alaşımlarını korozyondan korumak için kullanılan tipik bir çoklu kaplama sisteminin şeması.....	48
Şekil 6.2. Korozyonunun sık görüldüğü bölgeler	50
Şekil 6.3. Dış gövdede rastlanan korozyon bölgeleri.....	51
Şekil 6.4. Korozyon engellemesinde önemli parametreler	52
Şekil 6.5. Astar ve anotlamanın fonksiyonu	54
Şekil 8.1. Deneysel akış şeması	70
Şekil 8.2. Krom III içeren kaplamanın metale yapışma mekanizması.....	72
Şekil 8.3. Silan kaplamanın metale yapışma mekanizması.....	74
Şekil 8.4. Kesme ekipmanı; 1) Bıçak, 2) Ağırlık, 3) Test paneli, 4) Test paneli döndürme tablası, 5) Motor, 6) Test paneli döndürme tablası tutamacı	80
Şekil 8.5. Bant testi yapıştırma ve çekme işlemi; 1) Bant, 2) Kaplama yüzeyi, 3) Kesik yüzey, 4) Metal, a) Yapıştırma yönü, b) Bantı ayırma yönü	81
Şekil 8.6. Panellerin elektrik direnci ölçüm alanları	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 8.1. Kaplama proses hattı.....	76
Resim 8.2. Tuz püskürtme testi kabini.....	79
Resim 8.3. Elektriksel direnç testi ölçüm ekipmanı.....	82
Resim 8.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	85
Resim 9.1. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin 168 saat sonraki görüntüleri.....	88
Resim 9.2. Silan kaplaması yapılmış 6061-T6 panellerin 480 saat sonraki görüntüleri	89
Resim 9.3. Krom IV kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 7075-T6 panellerin 480 saat sonraki görüntüleri.....	90
Resim 9.4. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin boya yapışma testi sonrası görüntüleri.....	92
Resim 9.5. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panelin boya yapışma testi sonrası bant testi yapılmış yüzey detay görüntüsü.....	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m³	Metreküp
g	Gram
mg	Miligram
ml	Mililitre
L	Litre
m²	Metrekare
μΩ	Mikroohm
μm	Mikrometre
°C	Derece celsius

Kısaltmalar

Açıklamalar

3-GPTMS	3-glisidoksipropiltrimetoksisilanın
ASTM	American society for testing and materials
BTSE	Bis-1,2-(trietoksisilil) etan
CCC	Chromat Conversion Coating
CPCP	Corrosion protection and control program
EIS	Elektrochemical impedance spektroskopy
FE-AES	Field emission auger electron spektroskopy
FE-SEM	Field emission scanning electron microscope
FTIR	Fourier transform infrared spektroskopy
IRAS	Infrared reflectance absorbtion spektroskopy
PACS	Passivation of conversion coating
SEM	Scanning electron microscope
TCP	Trivalent Chromium Proses
TCS	Trivalent Chromium Surface
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

Kısaltmalar**Açıklamalar****VOC**

Volatile organic content

XPS

X-Ray Photoelectron spektroskopy

1. GİRİŞ

İlk havaaracı ile uçuş denemelerinden bu güne kadar geçen, yüz yıllık kısa sayılabilecek bir sürede, havaaraçlarında meydana gelen gelişmeler inanılması zor bir gerçektir.

Uzun mesafelerin kısa sürelerde kat edilebilmesi başta olmak üzere, yüksek hareket kabiliyeti ve esnekliği gibi üstünlükler, uçakları diğer araçlardan ayrı bir boyuta taşımıştır. Hızlı gelişmelerin temel sebebi de bu üstünlüklerdir.

Geçtiğimiz yüzyılda insanoğlu gerek askeri, gerekse ticari faaliyetlerde uçakların bütün faydalarından yararlanırken, önemli bir gerçeği de öğrenmiştir. Bu da en ufak hataların bile bedelinin çok ağır olabileceğidir. Öğrenilen bu gerçek üretimden kontrole, kullanımdan bakıma bütün uygulamaların ciddiyetini kat be kat arttırmıştır.

Havacılığın diğer önemli bir gerçeği ise uçabilmekle hafifliğin nerdeyse eş anlamlı olmasıdır. Uçakların daha hızlı uçabilmesinin, menzillerinin daha uzun, yakıt tüketiminin daha az olabilmesinin, daha yüksek irtifalara çıkabilmesinin ve daha fazla yük taşıyabilmesinin yolu hafiflikten, hafifliğin yolu ise kullanılan malzemelerden geçer. İşte bu sebep, yüksek dayanımdan ödün vermeden hafif ve uzun ömürlü malzemelerin, halen devam etmekte olan gelişim, üretim ve kullanım maratonunu başlatmıştır. Uçak malzemelerini geliştirmeye yönelik çalışmalar, diğer uygulama alanlarındaki gelişmelerde de büyük rol oynamaktadır.

Uçakları uzay çalışmalarından bağımsız olarak düşünmemek gerekir. Her iki alandaki gelişmeler de birbiriyle bağlantılı ve paraleldir. Yukarıda bahsedilen iki gerçek uçaklardan daha da önemli olarak sadece uzay araçlarında geçerli olabilir.

Gerek havacılık sektöründe ve gerekse uzay çalışmalarında sorumluluklar, maliyetler ve olası kayıplar çok yüksek olduğu için üretilen, kullanılan ve geliştirilmekte olan malzemeler olabileceğinin en doğrusu ve en iyisi olmalıdır.

Demir ve alaşımlarından sonra, endüstride en çok kullanılan ikinci metal alüminyumdur. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Bununla birlikte alüminyumun yüzeyinde oksit

(Al₂O₃)oluşumuyla metalin korozyona karşı dayanımının arttığı ileri sürölmektedir. Alüminyum yüzeyinde kimyasal dönüşüm kaplaması, yapısı ve kimyasal davranışlarının incelenmesi yaygın olarak çalışılan bir konudur [1].

Bu çalışmanın amacı, uygun kimyasal, zaman ve konsantrasyonda alüminyum yüzeyinde kimyasal dönüşüm kaplamaları geliştirilmesi, kararlı, kolay bozulmayan, dış etkenlere dayanıklı yüzey kaplamaları oluşturulması ve kromsuz, korozyona dayanıklı bu kaplamaların kararlılığının performans testleri ile kıyaslanmasıdır. Bu sayede alüminyum malzemelerin korozyon etkilerinden korunarak, ölkö ekonomisine katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

2. HAVACILIKTA KULLANILAN MALZEMELERİN SEÇİMİ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, her sektörde olduğu gibi imalat sektöründe de yeni boyutlarda arayışlar içerisindedir. Bu sektörün özellikle hassaslık gerektirecek uygulamalarda daha da yeni teknolojileri kullanma eğilimi artarken bir taraftan da malzeme konusunda gerekli özenin gösterilmesini zorunlu kılmaktadır. Çoğu ülkeler, gelişmişliklerini değerlendirirken uzay teknolojisine sahip olma varlıkları ile ölçebilmektedirler. Şüphesiz uzay teknolojisinin uygulandığı alanların başında risk faktörünün belki de en fazla olduğu uçak endüstrisi gelmektedir. Bu endüstri temelde incelendiğinde etkili faktörlerin başında malzeme konusunun büyük rol oynadığı görülmektedir[1].

Uçak yapımında kullanılacak malzemelerin seçiminde;

- Tasarım mukavemetinin ağırlığa oranı
- Yorulma karakteristikleri
- Çatlak yayılma davranışı
- Baskın arıza tipleri
- Hasar ve korozyon toleransı
- Mevcut imalat kolaylıkları
- Malzemenin maliyeti
- İmalat maliyeti
- Pazar gerekleri

faktörleri önemli rol oynamaktadır. Gerekli mukavemet değerlerine sahip, düşük yoğunlukta malzemeler seçildikten sonra onlara konstrüksiyonda istenilen şekillerin verilebilmesi, ancak uygun malzeme seçimi ve bu malzemelerin uygun işlem adımlarının uygulanabilmesi ile mümkün olabilmektedir. Ülkemizde uçak sanayiinin kurulmasına başlandığı ve yapılan uçakların yerli üretim miktarının artırılmak istendiği bu günlerde, bu alanda yapılacak çalışmalar milli uçak sanayimizde de büyük değere sahip katkılarda bulunacaktır. Bu nedenle tamamıyla yerli olarak geliştirilen ve üretilen hava araçları aşamasına varabilmek, ancak bu alanda yerli teknoloji üretimiyle gerçekleştirilebilir.

Hava araçlarında malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi de korozyon direncidir. Uçaklarda bakım faaliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturan

korozyon, tamamen önlenemediğinden durdurulmaya ve hasarı en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Korozyonun hızı uçağın tasarımına, kullanılan malzemeye, korozyondan korunma yöntemlerine ve çevreye bağlı olarak değişmektedir [2].

Korozyon uçağın ömrü ilerledikçe çeşitlenmekte ve çoğalmaktadır. Korozyon hasarları başlangıçta tespit edilemez ve tamiri yapılmaz ise bütün yapı için ciddi tehlike oluşturabilir. Özellikle uzun zaman serviste kalması istenen uçaklarda kullanım süresini etkilediği bilinmektedir. Kısa ömürlü uçaklarda korozyon hasarı toplam hasarın küçük bir kısmını oluştururken, uzun ömürlü uçaklarda ise toplam hasarın önemli bir kısmını meydana getirmektedir.

Uçaklar çeşitli atmosferik koşullarda (tropik, endüstriyel, denizel, karasal, çöl, kutuplar) bulunurlar. Uçak tipi aynı olsa bile farklı ortamlarda kullanılma, oluşacak korozyon hasarının miktarını değiştirir. Uçaklar kuru havada daha az korozyona uğrarken, nemli, ılık ve tuzlu ortamlarda daha kısa sürede korozyona uğrarlar. Uçak fazları esnasında (havalanma, uçuş, iniş) farklı ortamlara maruz kalırlar. Bu ortamlarda;

- İklim ve nem farklılığı
- Tuzlu su
- Havadaki tuzlar ve endüstriyel safsızlıklar (kirlilikler)
- Gün ışığı
- Hareket eden tuz ve kalıntılar

Korozyona neden olur Ortamın bu etkileri yanında bakım ve kullanım malzemeleri de korozyona neden olur. Bunlar:

- Yağlar ve hidrolik sıvılar
- Temizleme malzemeleri ve boya sökücüler
- Bakım esnasında oluşan çizintiler ve aşınmalar
- Kullanım ve bakım esnasında kazara oluşan hasarlar
- Batarya asitleri
- Egzost gazları
- Buzlanma ve donmayı önleyici sıvılar
- Uçuşta türbülansın sebep olduğu pislikler

- Kargo, tuvalet ve mutfak artıkları
- Yakıt bulaşması

Ayrıca uçaklarda kullanılan kimyasal maddeler (haşarat öldürücü ilaçlar, ateş söndürücü malzemeler, köpük veya benzerleri) direkt veya dolaylı olarak uçağı etkiler.

Korozyonun maliyeti, dolaysız ve dolaylı maliyetlerden oluşur. Dolaysız maliyet: Korozyonun tespiti (kullanılan malzemeler, araçlar) ve korozyonun giderilmesi, bakımı, tamiri (parça sökölmesi, temizlenmesi, kontrolü, gerekiyorsa yeni parça kullanılması, koruyucu işlemlerin uygulanması) için yapılan harcamalar oluşturur. Dolaylı maliyet: Elemanların eğitim harcamaları, uçağıın bakım için yerde tutulması ve servise başka uçağıın konulmasının getirdiğı maliyetlerdir [2].

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

3.1. Alüminyum'un Tarihçesi

Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanması ile gerçekleşmiştir. Alüminyum, diğer çok kullanılan metaller olan demir, kurşun ve kalay gibi, doğada bileşikler halinde bulunur. Alüminyum oksit halindeki bileşiğinden ilk ayıran ve elde eden kişi, 1807 yılında, Sir Humprey Davy olmuştur. Daha sonra, Hans Christian Oersted, Frederick Wöhler ve Henry Sainte-Clairre Deville, alüminyum eldesinde yenilikler getirmişlerdir.

Alüminyumun endüstriyel çapta üretimi ise, 1886 yılında ABD'de Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul T. Heroult'un birbirlerinden habersiz olarak yaptıkları elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Bu, günümüzde halen kullanılan yöntem olduğundan, 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886 yılında Werner von Siemens'in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K.J.Bayer'in, boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmış ve bu en genç metal, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur [3].

3.2. Alüminyum'un Özellikleri

Saf alüminyumun özellikleri;

- Kimyasal sembol: Al
- Atom numarası: 13
- Atom Ağırlığı: 26,98
- Kafes Yapısı: YMK
- Yoğunluğu: (20 °C) 2,6989 gr/cm³
(660 °C de sıvı) 2,37 gr/cm³
- Kaynama sıcaklığı: 2.300 °C
- Ergime sıcaklığı: 660,24 °C
- Ergime ısısı: 94,6 cal/gr

Bu özellikler alüminyuma ilave elementlerin etkisi ile değiştirilebilir. Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlar. Alüminyumun genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Alüminyum hafiftir. Aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır.
- Alüminyum, hava şartlarına, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvı ve gazlara karşı dayanıklıdır.
- Alüminyumun yansıtma kabiliyeti yüksektir. Gümüşü beyaz renginin bu özelliğe olan katkısı ile beraber gerek iç gerekse dış mimari için cazibeli bir görünüme sahiptir. Alüminyumun bu güzel görünümü, anodik oksidasyon (eloksal), lâke maddeleri vs. gibi uygulamalar ile uzun müddet korunabilir. Hatta birçok uygulamada tabii oksit tabakası bile yeterli olur.
- Çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksektir.
- Alüminyum elastik bir malzemedir. Bu nedenle ani darbelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, dayanıklılığı düşük sıcaklıklarda azalmaz. (Çeliklerin, düşük sıcaklıklarda ani darbelere karşı mukavemeti azalır.)
- Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir. Öyle ki, kalınlığı 1/100 mm'den daha ince olan folyo veya tel haline getirilebilir.
- Alüminyum ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletir.
- Alüminyuma şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm metotlar uygulanabilir.
- Alüminyum 40-540 N/mm² ortalama mukavemeti ile bir çok kullanım alanı için optimum çözümler sunmaktadır.

Alüminyum gerek ısı, gerekse elektrik açısından çok iyi bir iletkenidir. Saf halde iken iletkenlik amacından başka uygulamalarda kullanılmaz. Buna karşın, alaşımları mutfak eşyalarından uçak ve uzay araçlarına dek sayısız uygulama alanlarında kullanılır [4].

3.3. Alüminyum'un Doğada Bulunuşu

Yerkabuğunda bol miktarda (%7,5 - 8,1) bulunmasına rağmen serbest halde çok nadir bulunur ve bu nedenle bir zamanlar altından bile daha kıymetli görülmüştür. Alüminyum,

yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir. Bunun anlamı, insan var oldukça, yeterli alüminyum her zaman var olacaktır. Günümüzün en geçerli alüminyum hammaddesi olan boksitin bilinen rezervleri, hâlihazır tüketim hızına göre 3000 yıl yetecek miktardadır. Tüketim hızının iki misli miktarda yeni boksit rezervleri bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, kaolin esaslı yeni cevherlerden alüminyum eldesi için de çalışmalar devam etmektedir. Boksit, açık alan maden yataklarından çıkarılır. Daha sonra doğanın eski görünümünü alması için açılan yerler kapatılır ve ağaçlandırılır [5].

3.4. Alüminyum'un Eldesi

Alüminyum, yüzyıldan beri, tüm dünyada aynı yöntemle elde edilmektedir. Alüminyum eldesi, iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada, Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina elde edilir. İkinci aşamada ise, elektroliz ile alümina'dan alüminyum elde edilir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, suda kostik eriyiği ile muamele edilerek alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile "alümina" (alüminyum oksit) elde edilir. Bundan sonraki aşama, "alümina"nın "alüminyum"a dönüştürülmesidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina, elektroliz işleminin yapılacağı hücre adı verilen özel yerlere alınır. Burada amaç, alüminyum oksijenden ayırmaktır. Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanır. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır. Genel olarak, ağırlıkça 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir [5].

3.5. Alüminyum Kullanımının Endüstrilere Göre Gruplandırılması

Dünyadaki kullanımı, hem miktar hem de değer olarak demirden sonra gelir. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte, bakır, çinko, magnezyum, manganez ve silisyum gibi pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Yüksek dayanım/ağırlık oranlarından ötürü alüminyum alaşımları, uçak ve uzay araçlarının vazgeçilmez bileşenleridir.

- İnşaat
- Ambalaj

- Taşıt Araçları
- İletken olarak
- Mühendislik Uygulamaları
- Su arıtma
- Dayanıklı tüketim aletleri (cihazlar, mutfak araç gereçleri, vs.)
- Makine imalatı
- Yüksek saflıkta alüminyum, elektronik ve CD lerde

Toz haline getirilmiş alüminyum boyalara gümüşümsü renk vermede kullanılır. Alüminyum pulcukları (özellikle ahşap boyamada), astar boyalarınında katılabilir. Böylece kurumayla birlikte alüminyum pulcuklar su geçirmez bir tabaka oluşturur.

- Kolay şekillendirilebilir oluşu ve yüksek ısı iletkenliğinden ötürü, yeni bilgisayarlarınısı uzaklaştırıcılarında alüminyum kullanılır.
- Alüminyumun çok hızlı oksitlenme özelliği, katı roket yakıtı olarak ve diğer piroteknik kompozisyonların üretiminde kullanılmasına yol açar [6].

4. HAVACILIKTA KULLANILAN ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum ve alüminyum esaslı alaşımlar spesifik mukavemetlerinin oldukça iyi olması ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle uçak endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmaktadırlar. Son zamanlarda, alüminyum alaşımlarına kaynaklanabilme özelliğinin de kazandırılması ile bu endüstrideki kullanımları önemli ölçüde arttırılmıştır [1].

Alüminyum ve alüminyum alaşımları uçak endüstrisine 1930’larda girmiştir. O günden bu güne hem alüminyum sektöründe hem de uçak endüstrisinde birçok gelişmeler olmuş ve bu gelişmeler birbirini etkileyerek alüminyum alaşımlarını uçak endüstrisinin demirbaş malzemesi durumuna getirmiştir [7].

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri çok az miktarlarda da olsa metalin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanında alaşıma uygulanan çeşitli işlemler sonucunda mekanik özelliklerin uygun kombinasyonları elde edilebilmektedir.

Uçak endüstrisinde kullanılacak malzemede çizikler, küçük oyuklar ve benzeri hatalar vahim sonuçlar doğurabilir. Her ne kadar bu malzemeler sonradan sıyrılabilen maddelerle kaplanırsa da alüminyum alaşımlarının uçak endüstrisindeki uygulamasının her safhasında en önemli gereklerden biri yüksek kaliteli işçiliktir.

Alüminyum hava taşıtlarında kullanımının ilk zamanlarında oldukça iyi bilinen Al-Cu-Mg (2xxx) serisi alaşımlar kullanılmıştır. II. Dünya Savaşı sonrası ticari taşımacılık amacıyla kullanılan hava taşıtlarının geliştirilmesi yüksek mukavemetli üst kanat alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Bu sıralarda Boeing-707’lerde yüksek oranlarda Zn, Mg ve Cu içeren 7178-T6 alaşımı kullanılmıştır. Fakat yüksek mukavemetli bu alaşımların kırılma tokluğu sorunu ortaya çıkmıştır. Boeing-747 hava taşıtları geliştirildiğinde, bu sorun tasarım mühendislerinin daha düşük mukavemetli 7075-T6 ürünlerini kullanmaya zorlamıştır. Diğer hava taşıtı tasarım mühendisleri, 7075-T6 alaşımının sahip olduğu korozyon direncini yetersiz görüp, bu alaşımın mukavemet düşmesi pahasına korozyon direncini arttırmaya çalışmışlardır [1].

Alüminyum alaşımları işlem ve döküm alaşımlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu ana gruplarda, ısıtıl işlem görebilen ve göremeyen alaşımlar olarak iki alt gruba ayrılır. İlerleyen

bölümde alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemi koşullarına, uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılan işlem ve döküm alüminyum alaşımlarına ve özelliklerine değinilecektir.

Çizelge 4.15’de genel olarak uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımları ve kullanılmaya yerleri belirtilmiştir.

4.1. İşlem Alüminyum Alaşımları

İşlem alüminyum ve alaşımları için dünyada en yaygın kullanılan simgeleme dizgesi, Amerikan Standartlar Birliği tarafından belirlenen dizgedir. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtmektedir. İkincisi özgül alaşım değişimini ifade eder. Son iki rakam da özgül alüminyum alaşımını saptar veya alüminyumunsafiyetini gösterir. Alüminyum alaşım Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılır.

Çizelge 4.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılma dizgesi

Seri Numarası	Tanım
1XXX	Alaşımsız Al
2XXX	Bakırlı Al Alaşımı
3XXX	Manganezli Al Alaşımı
4XXX	Silisyumlu Al Alaşımı
5XXX	Magnezyumlu Al Alaşımı
6XXX	Silisyum ve Magnezyumlu Al Alaşımı
7XXX	Çinkolu Al Alaşımı
8XXX	Demir ve Silisyumlu Al Alaşımı
9XXX	Yeni bulunan alaşımlar (Örnek: Lityumlu Al alaşımı)

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemi durumları, 4 haneli seri numaralarının arkasına ilave edilen harflerle tanımlanır. Esasen 4 tür ısıtılma işlemi göstergesi kullanılmaktadır. Bunlardan (O) tavlı; (F) fabrikasyondan sonraki hali; (H) rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekilendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı; (T) ısıtılma işlemi halini göstermektedir [7].

4.1.1. Havacılıkta en çok kullanılan işlenebilir alüminyum alaşımları[7]

2024 alaşımı

Kimyasal bileşim sınırları

Çizelge 4.2. 2024 alaşımının kimyasal bileşenleri

Bileşenler	Cu	Si	Mn	Mg	Fe	Zn	Diğer	Al
% Ağırlık	3,8-4,9	3,8-4,9	0,3-0,9	0,5max	0,5max	0,5max	0,15max	Kalan

Tipik kullanım yerleri

Çeşitli yapısal parçalar. Uçak endüstrisinde yapı elemanlarında (gövde ve kanatta) helikopter rotor zarflarında, perçinlerde kullanılır.

Fiziksel özellikleri

Çizelge 4.3. 2024 alaşımının fiziksel özellikleri

Yoğunluğu (20 °C'da):	2,77 g/cm ³
Likidüs Sıcaklığı:	638 °C
Solidüs Sıcaklığı:	502 °C
Isısal Genleşmesi (20-200 °C'da):	23,9 mikro inç/inç/°C

Isıl işlemleri

Çizelge 4.4. 2024 alaşımının ısı işlemleri

	Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)	Soğutma hızı
Tam Tavlama:	413	2-3	260 °C'a kadar fırında soğutma
Soğuk İşlemin Giderilmesi:	343	Yok	Kritik değil
Solüsyona alma:	488-499	Tuz banyosunda 10 dak.-1 saat	Soğuk suda soğutma
Çökeltme (T4):	Oda sıcaklığı	48	Kritik değil
Çökeltme (T81):	188-193	11-13	Kritik değil

Mekanik özellikleri

Çizelge 4.5. 2024 alaşımının mekanik özellikleri

	<u>O</u>	<u>T3</u>	<u>T4</u>	<u>T36</u>
Çekme Dayanımı (kg/mm ²):	18,9	49,9	47,8	50,6
Akma Dayanımı (kg/mm ²):	7,7	35,1	33,0	40,0
% Uzama (a):	19	16	20	13
% Uzama (b):	22	-	19	-
Sertlik (HB):	22	-	19	-
Kesme Dayanımı (kg/mm ²):	12,7	28,7	28,7	29,2
Yorulma Sınırı (kg/mm ²):	9,2	14,0	14,0	12,6

Kaplı ürünler

Çizelge 4.6. Kaplı 2024 alaşımının mekanik özellikleri

	<u>O</u>	<u>T3</u>	<u>T4</u>	<u>T36</u>
Çekme Dayanımı (kg/mm ²):	18,9	45	45	47,5
Akma Dayanımı (kg/mm ²):	7,7	31	29,8	37,2
% Uzama (a):	19	15	19	11
Kesme Dayanımı (kg/mm ²):	12,6	28,1	28,1	28.8

Kaplı ürünlerin kaplama etkisi nedeniyle bazı mekanik özelliklerinde anlamlı değişim olmaz. % Uzama (a) 3 mm kalınlığındaki levha, % uzama (b) 12 mm çapındaki yuvarlak numunelerdeki % uzamayı göstermektedir. Elastiklik modülü her iki tip üründe de aynı olup, $7,4 \cdot 10^3$ kg/mm² dir. Bu tipik mekanik özellikler çeşitli şekil ve boyuttaki parçaların ortalama mekanik özelliklerini göstermektedir.

6061 alaşımı

Kimyasal bileşim sınırları

Çizelge 4.7. 6061 alaşımının kimyasal bileşenleri

Bileşenler	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Zn	Diğer	Al
% Ağırlık	0,8-1,2	0,4-0,8	0,15-0,4	0,15-0,4	0,7	0,15	0,25max	0,15	Kalan

Tipik kullanım yerleri

Çok iyi korozyon direnci, üstün dayanım, şekillenebilme, kaynaklanabilme kabiliyeti aranan yerlerde kullanılır. Uçak iniş takımlarında, yağ pompalarında, borularda ve kaynaklı parçalarda kullanılır.

Fiziksel özellikleri

Çizelge 4.8. 6061alaşımının fiziksel özellikleri

Yoğunluğu (20 °C’da):	2,70 g/cm ³
Likidüs Sıcaklığı:	649 °C
Solidüs Sıcaklığı:	582 °C
Isıl Genleşmesi (20-200 °C’da):	24.3 mikro inç/inç/°C

Isıl işlemleri

Çizelge 4.9. 6061alaşımının ısı işlemleri

	Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)	Soğutma hızı
Tam Tavlama:	413	2-3	260 °C’a kadar fırında 10 °C/saat hızla soğutulur
Soğuk İşlemin Giderilmesi:	343	Bekletmek gerekmez	Kritik değil
Solüsyona alma:	516-543	Tuz banyosunda 10 dak.-1 saat arasında, havada daha uzun	Soğuk suda soğutma
Çökeltme:	174-179	6-10	Kritik değil

Mekanik özellikleri

Çizelge 4.10. 6061 alaşımının mekanik özellikleri

	Çıplak Alaşım			Kaplı Alaşım		
	<u>O</u>	<u>T4</u>	<u>T6</u>	<u>O</u>	<u>T4</u>	<u>T6</u>
Çekme Dayanımı (kg/mm ²):	12,6	24,5	31,5	11,9	22,4	28,7
Akma Dayanımı (kg/mm ²):	5,6	14,7	28	5,6	13,4	25,2
% Uzama (a):	25	22	12	25	22	12
% Uzama (b):	30	25	17	-	-	-
Sertlik (HB):	30	65	95	-	-	-
Kesme Dayanımı (kg/mm ²):	8,7	16,8	21	8,7	16,1	20,3
Yorulma Sınırı (kg/mm ²):	6,3	9,5	9,5	-	-	-

Her iki tip üründe de elastiklik modülü $7,0 \cdot 10^3$ kg/mm² dir. % Uzama (a) 1,6 mm kalınlığında levha, (b) ise 12 mm çapında çubuk numunelerdeki % uzamaları göstermektedir. Brinell sertlik değeri 500 kg yük ve 10 mm çapında bilye kullanılarak ölçülmüştür.

7075 Alaşımı*Kimyasal bileşim sınırları*

Çizelge 4.11. 7075 alaşımının kimyasal bileşenleri

Bileşenler	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Diğer	Al
% Ağırlık	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	0,18-0,4	0,3	0,7	0,5	0,2max	0,15	Kalan

Tipik kullanım yerleri

Çok üstün dayanım ve iyi korozyon direnci gerektiren yarlarda kullanılır. Uçaklarda yapısal malzeme olarak kullanılır.

Fiziksel özellikleri

Çizelge 4.12. 7074 alaşımının fiziksel özellikleri

Yoğunluğu (20 °C'da):	2,80 g/cm ³
Likidüs Sıcaklığı:	638 °C
Solidüs Sıcaklığı:	476 °C
Isıl Genleşmesi (20-200 °C'da):	24.3 mikro inç/inç/°C

Isıl işlemleri

Çizelge 4.13. 7075 alaşımının ısı işlemleri

	<u>Sıcaklık (°C)</u>	<u>Zaman (saat)</u>	<u>Soğutma hızı</u>
Tam Tavlama:	413	2-3	Havadasoğutulur
Soğuk İşlemin Giderilmesi:	349	Bekletmek gerekmez	Kritik değil
Solüsyona alma:	460-499	Tuz banyosunda 10 dak.-1 saat arasında, havada daha uzun	Soğuk suda soğutma
Çökeltme:	118-124	24-28	Kritik değil

Mekanik özellikleri

Çizelge 4.14. 7075 alaşımının mekanik özellikleri

	<u>Çıplak Alaşım</u>		<u>Kaplı Alaşım</u>	
	<u>Q</u>	<u>T6</u>	<u>Q</u>	<u>T6</u>
Çekme Dayanımı (kg/mm ²):	23,1	58,3	22,4	53,4
Akma Dayanımı (kg/mm ²):	10,5	51,3	9,8	47,1
% Uzama (a):	17	11	17	11
% Uzama (b):	16	11	-	-
Sertlik (HB):	60	150	-	-
Kesme Dayanımı (kg/mm ²):	15,4	33,7	15,4	32,3
Yorulma Sınırı (kg/mm ²):	-	16,7	-	-

Bu tipik mekanik özellikler çeşitli şekil ve boyuttaki parçaların ortalama özelliklerini göstermektedir. % Uzama 12 mm çapında yuvarlak numune üzerinde ölçülmüştür. Brinell sertlik değeri 500 kg yük ve 10 mm çapında bilye kullanılarak ölçülmüştür. Ekstrüzyonla imal edilen parçalar yukarıda T6 temperi (çıplak) için verilen çekme ve akma değerlerinden %10 daha yüksek değerlere sahiptir. Her iki tip ürün için elastiklik modülü $7,3 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ dir.

4.2. Alüminyum Alaşımları İçin Isıl İşlem Kondisyon Göstergeleri

Döküm veya biçimlendirilmek suretiyle elde edilen, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıtıl işlem durumları, ilave edilen bir veya birkaç harf ile tanımlanır.

Esasen 4 tür ısıtıl işlem göstergesi kullanılmaktadır. Bunlardan (O) tavlı; (F) fabrikasyondan sonraki hali; (H) yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı (T) ısıtıl işlem halini göstermektedir. (W) solüsyona alma ısıtıl işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı göstermekle beraber, şayet zamanı verilmiş ise o takdirde belirli bir ısıtıl işlem ifade edilmiş olmaktadır.

Çeşitli ısıtıl işlemlerin niteliklerine ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

F: Fabrikasyondan sonraki hali (üretildiği gibi)

Bu hal; Mukavemet veya sertliğini değiştirmek amacıyla hiçbir ilave işlem yapılmaksızın, imâl edildikten sonraki fiziksel yapısını belirtmektedir. Biçimlendirilen alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin hiçbir garantisi yoktur. Döküm hali için, örneğin 43-F işareti kullanılmaktadır.

O:Tavlı, yeniden kristalize olmuş hali:Biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak halidir.

H:Genellikle, yassı ürünler (levha/sac) için kullanılan bir notasyondur. Soğuk biçimlendirme (yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan plastik şekillendirme) sonucu ve kısmi bir yumuşama elde etmek üzere ilave ısıtıl işlemin yapıp yapılmamasına rağmen biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarında elde edilen mukavemet ve sertlik artışını ifade eder. (H) dan sonra genellikle iki veya daha fazla rakam vardır. İlk rakam, esas işlemleri

ifade eder. Daha sonraki rakamlar, plastik şekillendirme sınırları içindeki nihai fiziksel özelliklerini belirtir.

Bu rakamların ifade ettiği özellikler aşağıda belirtilmiştir:

H1: Plastik şekillendirme sınırları içinde sadece şekil verilmiştir. İkinci rakam, yapılan soğuk işlemi ifade etmektedir. Şöyle ki; 8 rakamı erişilebilen en sert hali ifade eder. Böylece (H18) Bu sonucu gösterir. En sert ile yumuşak arasındaki orta sertlik (H14) şeklinde ifade edilir. Aynı şekilde dörtte bir sertlik ise (H12) şeklinde belirtilir.

Üçüncü rakam, ekseriya ayrı özellikleri belirtmek için kullanılır.

Şöyle ki; (H141), (H14) sağladığı aynı minimum özellikleri vermekle beraber maksimum değerler standart değerlere daha çok yakındır. Üçüncü rakam, (H14) den daha farklı değerleri ifade etmekle beraber (H13) veya (H15) in yerine kaim olacak ölçüde değildir. Çok sert özellikler, üçüncü rakam olsun veya olmasın, ikinci rakam olarak (9) kullanıldığı zamanı belirtilirler. (H112) işareti "kontrollü" olarak, F-ısıtıl işlem halinin garanti edilmiş mekanik özelliklerini gösterir.

H2: Plastik şekillendirmeden sonra kısmi tav halini ifade eder. Alaşımın plastik şekil alma sonucu belirli bir mukavemet ve sertlik sağladıktan sonra kısmen tav yapılarak bu değerlerin istenen sınırlar içine indirilmesi demektir. Bu durum, ilk rakamın 2 olarak yazılması ile belirtilir. İstenen kalıcı mukavemet ve sertlik (H1) de olduğu gibi ikinci rakam ile belirtilir. Örneğin: H28 tam sert, H24 yarı sert ifade eder. Oda sıcaklığında yaşlanma yumuşaması sağlayan alaşımların H2 hali H3 ün fiziksel özelliğine eşit olmaktadır. Diğer alaşımlar bahis konusu olduğunda, H2 hali yaklaşık olarak H1'in fiziksel özelliklerine eşit olmakla beraber, uzama kat sayısı biraz daha fazladır.

H3: Plastik şekillendirme ve daha sonra kararlı hali. Magnezyum ihtiva eden alüminyum alaşımları düşük sıcaklıklara ısıtılmak suretiyle stabilize edilerek mukavemetleri biraz azaltılırken onların şekil alma özellikleri artırılmaktadır. Bu işlem yapılmaz ise, bahis konusu değişiklik oda sıcaklığında çok uzun sürede meydana gelir. Bu işlem (H) dan sonraki üçüncü rakam ile ifade edilmektedir. Plastik şekillendirme işlemi de (H) dan sonraki iki veya ilk rakam ile ifade edilir.

W: Solüsyona alma ısıtıl işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı ifade eder. Bu hal doğal yaşlanmadan ötürü, yaşlanma süresinin verilmesi ile belirtilmiş olur. Örneğin 2024 W (1/2 saat), 7075 W (2 ay) vb.

T: F,O,H halleri dışında, yapıda kararlılığın sağlanması amacıyla uygulanan ısıtıl işlemleri belirtmektedir. Bu harf plastik şekillendirme yapılsın veya yapılmasın yapının kararlı hale gelmesi için uygulanacak ısıtıl işlemi ifade eder. T harfinden sonra 2'den 9'a kadar rakam eklenebilir. Bu rakamlar uygulanacak belli başlı işlemleri gösterirler. 6061-T6 rumuzu alındığında, bahis konusu alaşım için esas işleme ilave olarak değişik özellikleri sağlayacak şekilde ayrı işlemlerin uygulanması istendiğinde bu esas rumuza ilaveler yapılmaktadır. Şöyle ki; 6061-T62'de olduğu gibi.

Oda sıcaklığında tabii yaşlanma, esas ısıtıl işlemler yapılırken veya yapıldıktan sonra uygulanabilmektedir. Süre, metalurjik açıdan önem taşıyorsa o zaman kontrol edilir. Fakat aksi halde belirtilmemiş olur.

T: T notasyonu, ısıtıl işlem yapılarak elde edilen temperleri ifade eder. Isıtıl işlemlerinin değişik türleri, aşağıdaki harf ve rakam göstergeleriyle ifade edilmektedir.

T1: Sıcak işlemden sonra soğutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T2: Sıcak işlemden sonra soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T3: Solüsyona alma ısıtıl işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir

T4: Solüsyona alma ısıtıl işleminden geçirilir, yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik)

T5: Sıcak işlemden sonra soğutulur ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik)

T6: Solüsyona alma ısıtıl işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik)

T7: Solüsyona alma ısıtıl işleminden geçirilir ve aşırı yaşlanma yapılır.

T8: Solüsyona alma ısııl işleminden geçirilir, soğuk işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma yapılır (Termik)

T9: Solüsyona alma ısııl işleminden geçirilir, yapay yaşlanma yapılır (termik) ve soğuk işleminden geçirilir.

T10: Sıcak işleminden soğutulur, soğuk işleminden geçirilir ve yapay olarak yaşlandırılır (Termik).

Ekler:

Ek 1.Solüsyona alma ısııl işlemi: Alüminyum alaşımı bünyesindeki alaşım elemanlarını katı çözeltiye almak için malzemenin 520 °C veya üzerinde belirli bir süre tutulup ani olarak soğutulması. Bazı alüminyum alaşımlarında (örneğin 6060/6063/AlMgSi0.5) ekstrüzyon gibi sıcak bir procesten sonra malzemenin hava ya da su ile ani soğutulması, solüsyona alma ısııl işlemi sonucunu verir.

Ek 2. Doğal yaşlandırma: Alüminyum alaşımının oda sıcaklığında bekletilmesiyle, katı çözelti içindeki alaşım elemanlarının katı çözeltiden ayrılıp çökelerek "çökelme sertleşmesi" mekanizması ile malzemenin sertliğinin artması.

Ek 3.Yapay yaşlandırma: Doğal yaşlandırma ile elde edilemeyecek kadar yüksek sertlik değerlerinin bir ısııl işlem fırında belirli sıcaklık ve sürede yapılması. (Örnek: 6060/6063/AlMgSi0.5 alaşımı için 180 °C sıcaklıkta 5 saat).

Ek 4. Termik: Alüminyumun "yapay yaşlandırma ısııl işlemi"ne Türkiye ekstrüzyon sektöründe verilen ad [7].

Çizelge 4.15. Alüminyum alaşımlarının uçaklardaki genel kullanım yerleri

Kullanım Yeri	Alaşım
Genel motor dökümlerinde	355 T6 veya T71
Motor yağ pompalarında	6061 T6
Silindir kafalarında	(İşlenebilir döküm) 2218 T6 veya T72 142 T77
Uçak kanadı ana kirişi ve diğer Bağlantı malzemelerinde	2014 T6 7075 T6 7079 T6
Uçak dış kaplamasında	2024 T3 7075 T6
Motor pistonlarında	4032 T6 2018 T61 2618 T6
Pervanelerde	2014 T6 2025 T6
Perçinlerde	2117 T4 2017 T4 2014 T4 2024 T4
Yağ boruları ve burçlarda	2024 T4
Kontrol dirsekleri ve kasnaklarda	195 T6 356 T6 355 T6 40 E
Helikopter poyralarında	2014 T6
Hidrolik (borularda) aksamında	2024 T6 5052 O 6061 T4
Su tankları	6061 T6
Aletler, kutular vs.	218 ve 380 (pres döküm)
İsim levhaları	1100 O 3003 O

5. ALÜMİNYUM KOROZYONU VE ÇEŞİTLERİ

Korozyon; metalin görünümünün, yüzey özelliklerinin veya mekanik özelliklerinin çevresel koşulların etkisi altında yavaş veya hızlı ilerleyerek bozulmasıdır. Bahsedilen çevre koşulları; atmosfer, su, deniz suyu, çeşitli çözeltiler, organik ortam ve benzerleridir. Korozyon olgusu metallerin bulunuşundan beri bilinmektedir. Korozyon ile ilgili çalışmalar 19. yüzyılda başlamış ve korozyonun elektrokimyasal teorisi 1830 yılında geliştirilmiştir. Alüminyum üzerine bilinen ilk deneyler ise 1890 yılı itibariyle alüminyumun yaygınlaşmasıyla başlamıştır. Bu tarihlerde ayrıca alüminyumun yağmur suyuna ve bira, çay, kahve gibi çeşitli içeceklerle dayanımı belirlenmiştir.

5.1. Alüminyum Korozyonunun Elektrokimyasal Temeli

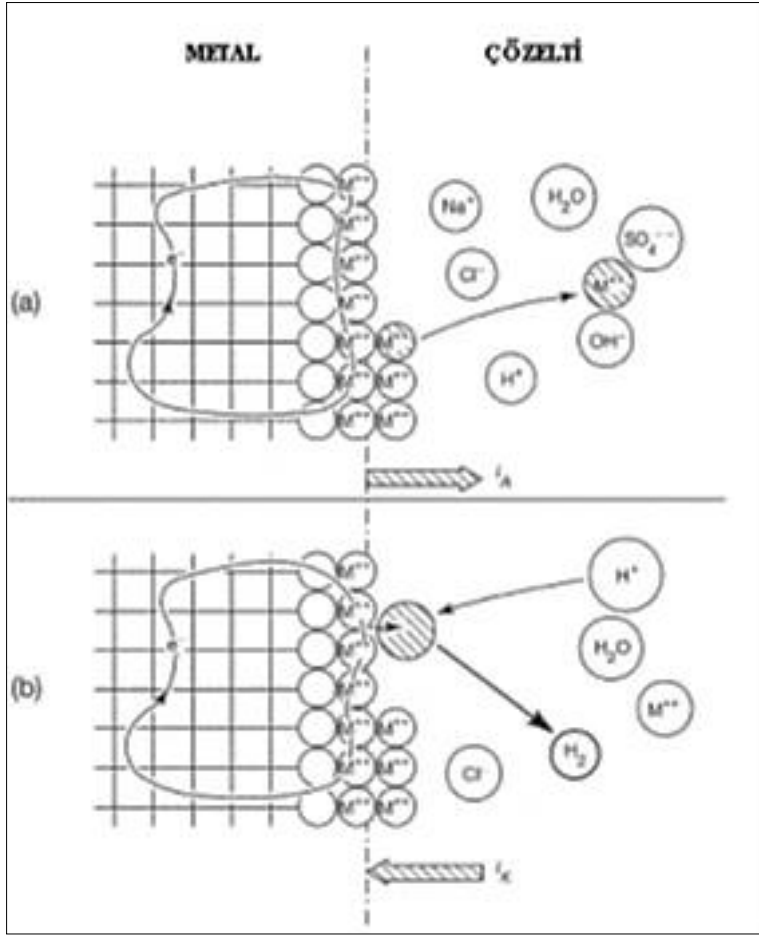
Metallerin korozyonu saf metal veya alaşımının sulu bir faz ile elektrokimyasal reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Korozyon, malzemenin atomik yapısı ile ilgili olan karmaşık elektrokimyasal reaksiyonlar ile ilerlemektedir. Malzemeler, iyon ve elektron adı verilen elektrik yük taşıyan temel parçacıklardan ve bu temel parçacıklardan oluşan nötr atomlar ve moleküllerden oluşur. Metallerde atomların elektriksel ortamı serbest elektronlardan oluşur ve bu elektronlar metal içerisinde dolaşabilme kabiliyetindedirler.

Çözeltilerde aşağıdaki haller bulunabilir;

- Pozitif iyonlar (katyonlar) ve negatif iyonlar (anyonlar)
- Su gibi nötr moleküller ve çeşitli ayrışmamış bileşikler

Metal ve su ara yüzeyinde elektrik yüklerin transferi elektrokimyasal reaksiyona neden olur.

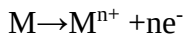
Metal- çözelti ara yüzeyinde reaksiyona giren elektronlar çözeltiye nüfuz etmez. Şekil 5.1’de metal-çözelti ara yüzeyindeki reaksiyonlar gösterilmiştir [8].



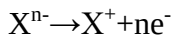
Şekil 5.1. Metal-çözelti ara yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyonlar; a) Metal atom okside olur ve oluşan M^{n+} iyonları sulu faza geçer. b) Sulu fazda iyonlar ve moleküller indirgenir. Metalden elektron olarak diğer kimyasal türlere dönüştürülür [8].

Metal korozyonu elektriksel olarak dengede iki reaksiyonun sonucu gerçekleşir;

- Elektron kaybı ile sonuçlanan metal oksidasyonu aşağıdaki temel reaksiyona göre olur;



- Sulu çözeltideki iyonun indirgenmesi aşağıdaki temel reaksiyona göre olur;



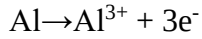
- Oksidasyon ve indirgenme reaksiyonları metal yüzeyinin açık bölgelerinde olur. Oksidasyonun gerçekleştiği yüzey anot olarak adlandırılır. Negatif yükler taşır ve (-) işareti ile temsil edilir. İndirgenme katot denilen yüzeyde gerçekleşir ve (+) işareti ile temsil edilir.

Elektrokimyasal reaksiyonların oluşabilmesi için X^- iyonlarının indirgenerek metal yüzeyine ulaşması gerekir ya da tam tersi Mn^+ katyonları metal yüzeyini terk etmelidir. Çözelti içerisindeki oksijenin difüzyon direnci gibi çeşitli olgular iyonların hareketini engelleme ya da anottaki oksidasyonu, katottaki redüksiyonu geciktirme eğilimindedir. Çünkü elektrot yüzeyi korozyon ürünlerinin ya da inhibitörlerin birikiminden kaynaklanan değişikliğe uğrar. Polarizasyon olarak adlandırılan elektrokimyasal reaksiyonlardaki bu gecikmenin anlamı termodinamik olarak reaksiyonların artık tersinir olmadığıdır ve korozyon hızının azalacağıdır. Diğer yandan elektrot reaksiyonları aşağıdaki denge reaksiyonu kalıcı olarak sağa tarafa yönlendiğinde artabilir. Bu olay sürekli çözünme sağlar [8].

Örneğin, dış akım ya da güçlü dağlayıcı ajanlar etkisindeyken. Bu olaydan mümkün mertebe kaçınmaya çalışılır [8].



Alüminyumun sulu ortamda korozyonundaki temel reaksiyonlar birçok çalışmanın konusu olmuştur. Basitleştirilmiş ifadelerle alüminyumun sudaki oksidasyonu aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir;



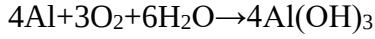
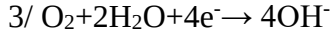
Bu reaksiyon çözeltideki iyonların açığa çıkan elektronları kapmasıyla gerçekleşen indirgenme reaksiyonu ile dengelenir. Taze su, deniz suyu ve nem gibi nötr pH'a yakın sulu ortamlarda bilinen indirgenme reaksiyonu aşağıdaki gibidir;

Suda çözünen oksijenin redüksiyonu:

- Alkali ya da nötr ortamda: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
- Alkali ya da nötr ortamda: $H_2O + 2e^- \rightarrow 1/2 H_2 + OH^-$

Sulu ortamda alüminyumun korozyonu, oksidasyon ve redüksiyon elektrokimyasal reaksiyonlarının toplamıdır.





Elektronegatif potansiyele sahip metaller oksitlenmeye meyillidir ve sulu ortamda korozyona uğrarlar. Bu istek, potansiyelin daha elektronegatif hale gelmesiyle artar. Magnezyumun nem etkisi altında kurşuna göre daha fazla bozulacağı buradan tahmin edilir. Alüminyumun standart elektrot potansiyeli -1.66 V ile oldukça negatiftir. Bu yüzden alüminyum nemin varlığı halinde oldukça kararsız olması beklenir ancak alüminyumu kaplayan doğal oksit filmi termodinamik öngörüğü değiştirir ki alüminyum pasif bir metaldir. Standart elektrot potansiyeli termodinamik bir parametredir ve sadece verilen reaksiyonun mümkün olup olmadığını açıklar. Reaksiyonun kinetiği ile ilgili bilgi vermez. Standart potansiyel skalanın iki metalin birbirine göre durumlarını vermesinden dolayı iki metal temastayken hangisinin anot olarak davranacağı bilinir. Her zaman daha fazla elektronegatif metal çözünür [8].

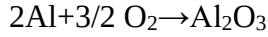
Alüminyumun elektrokimyasal davranışını üzerindeki doğal oksit film etkiler. Bu film alüminyumun korozyon dayancını etkiler. Alüminyumun ölçülen potansiyeli sadece metalin değil, oksit tabaka ve metalin karışık potansiyelidir. Su gibi oksitleyen ortamlarda oksit tabanın 1 ms veya daha kısa bir sürede oluşmasından ötürü metalden ayrı düşünülemez.

Alüminyumun davranışını tahmin etmede oyuklanma potansiyeli çelikteki gibi aynı öneme sahip değildir. Çelikte oyuklanma potansiyelinde belirlendiği üzere başlangıç aşamasında kontrol altına alınır. Alüminyumun matrise göre katodik potansiyelli intermetalik fazların çevresinde çok küçük ve çok sayıda yüzeysel oyuk başlangıcı her zaman olacaktır.

Alüminyumda korozyon nötr ortama yakın koşullarda oyuklanma olarak görülür [8].

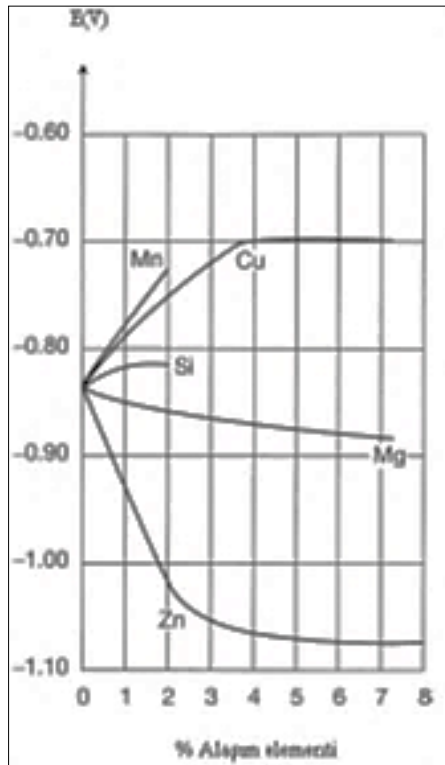
Alüminyum doğal olarak pasiftir ve bu yüzden pasifleştirmeye ihtiyaç duymazlar. Bir metal kimyasal işleme maruz kalıyorsa ya da alaşım elementi içeriyorsa pasifleştirilebilir. Bu işlem alüminyuma uygulanmaz çünkü her zaman doğal oksit film ile kaplıdır. Yüksek elektronegatifliğinden dolayı alüminyum en kolay okside olan metallerdendir. Fakat özellikle su, hava gibi oksitleyici atmosferlerde oldukça kararlı davranır. Bunun nedeni alüminyumun tüm diğer pasif metaller gibi sürekli ve homojen doğal oksit filmi ile kaplı

olmasındandır. Bu film oksitleyici atmosferlerde kendiliğinden oluşan Al_2O_3 'tür ve aşağıdaki reaksiyona göre oluşur;



5.1.1. Alüminyumun çözünme potansiyeli

Alaşım elementleri alüminyumun potansiyelini her iki yönde de değiştirebilir. Bir alaşımın çözünme potansiyeli metal yüzeyinin büyük bölümü ile kararlaştırılır. Alüminyumun çözünme potansiyeline alaşım elementlerinin etkisi şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Alüminyumun çözünme potansiyeline alaşım elementlerinin etkisi [8]

Çinko potansiyeli fazlaca düşürür bu yüzden 7xxx serisi alaşımların elektronegatif potansiyeli en fazladır. Bakır içeren 2xxx serisi alaşımlar ise en az elektronegatif potansiyele sahiptir. En bilindik alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyelleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyeli (NaCl çözeltisinde, H₂O₂, ASTM G69) [9]

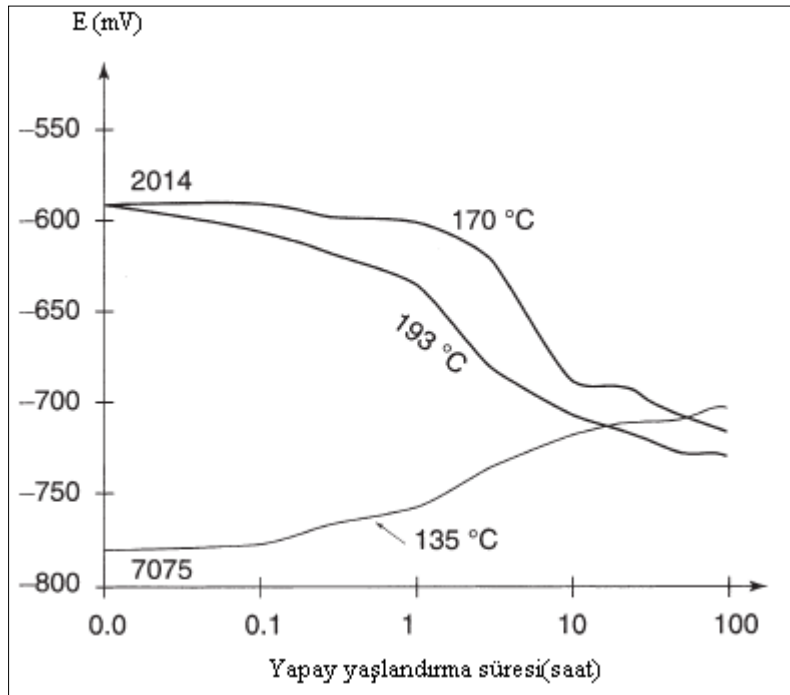
Alaşım	İsl işlem	Potansiyel (mV)	Alaşım	İsl işlem	Potansiyel (mV)
1060		-750	5456		-780
1100		-740	6005A		-710
1199		-750	6009	T4	-710
2008	T4	-690	6010	T4	-700
	T6	-700	6013	T6, T8	-730
2014	T4	-600	6053		-740
	T6	-690	6060		-710
2017	T4, T6	-600	6061	T4	-710
2024	T3, T4	-600		T6	-740
	T8	-710	6063		-740
2090	T3, T4	-650	7003		-940
	T8	-750	7005		-840
2091	T3, T8	-670	7039	T6, T63	-840
2219	T3, T4	-550	7049	T7	-750
	T6, T8	-700	7050	T7	-750
3003		-740	7072		-860
3003/7072		-870	7075	T6	-740
3004		-750		T7	-750
5042		-770	7178	T6	-740
5050		-750	7475	T7	-750
5052		-760	8090	T3	-700
5056		-780		T7	-750
5083		-780	42000 (A-S7G03)		-820
5086		-760	45000 (A-S6U3)		-810
5154		-770	51200 (A-G10)		-890
5182		-780	51300 (A-G5)		-870
5454		-770	71000 (A-Z7GU)		-990

İntermetalik fazların çözünme potansiyelleri katı eriyikten farklı olmasına rağmen çözünme potansiyeline etkisi yoktur. Fakat bunlar tane sınırlarına yakın ise ya da tane sınırlarında kümelenmişse taneler arası, tabakalaşma ya da gerilmeli korozyonu riskini artırır [8]. Çizelge 5.2’de alüminyum alaşımlarında bulunabilecek intermetalik fazların çözünme potansiyelleri görülmektedir.

Çizelge 5.2. İntermetalik fazların çözünme potansiyeli (NaCl çözeltisinde, H₂O₂, ASTM G69) [9]

İntermetalik Fazlar	Çözünme Potansiyeli(mV)
Si	-170
Al ₃ Ni	-430
Al ₂ Cu	-440 and -640
Al ₃ Fe	-470
1050A	-750
Al ₆ Mn	-760
Al ₂ CuMg	-910
MgZn ₂	-960
Al ₃ Mg ₂	-1150
Mg ₂ Si	-1190

2xxx ve 7xxx serisi alaşımlarda çözünme potansiyelleri ısı işleme de bağlıdır. İntermetalik fazların çözünme potansiyellerini ölçmek boyutların çok küçük olmasından dolayı zordur. Bunlar boyutları genellikle 100 µm altındadır. Ancak alaşım ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde soğutma koşullarının intermetalik fazların bileşiminde ve boyutlarında etkili olduğu sonucuna varılır. Şekil 5.3'te yaşlandırma süresinin 2014 ve 7075 alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyeline etkisi görülmektedir [8].



Şekil 5.3. Yaşlandırma süresinin 2014 ve 7075 alüminyum alaşımlarının çözünme potansiyeline etkisi [8]

Alaşım elementlerinin ve ilavelerin konsantrasyonu metal ve doğal oksit filminde genellikle farklıdır. Oksidin oluşma hızı ve yüzey özellikleri altında bulunan metale değil kendi kompozisyonuna bağlıdır. Örneğin metalin oksidasyon hızı alaşım elementi ilavesi ile düşürülebilir. Oksijen ile reaksiyona girer ve oksit film oluşturarak difüzyon hızını azaltır. Belirli elementler oksit filmin koruyucu özelliklerini karışık oksitler oluşturarak güçlendirir. 5xxx serisi alaşımlar mükemmel korozyon dayanımına sahipken bakır gibi belirli elementler bu koruyucu özellikleri zayıflatır. Bu da bakır içrikli 2xxx ve 7xxx serisi alaşımların korozyon direncinin düşüklüğünü açıklar.

Çözünme hızı asidik ve alkalın pH değerlerinde daha yüksektir. Asidik veya alkalın pH'da çözünme potansiyeli suda çözünen asit veya bazın niteliğine de bağlıdır. Belirli bir pH değerinde alüminyum üzerinde hidroklorik asit veya hidroflorik asit, asetik asit çözeltilerine göre daha saldırgandır. Tüm diğer pasif metaller gibi alüminyum nötr'e yakın sulu ortamlarda oyuklanma korozyonuna yatkındır. Bu koşullar altında oyuklanma korozyonu klorür gibi anyonların miktarına, sulu ortamın pH değerinden daha çok bağlıdır [8].

5.2. Alüminyum ve Alaşımlarında Görülen Korozyon Çeşitleri

Alüminyumda değişik tipte korozyon çeşitleri görülür. Bunların bazıları çıplak gözle görülebilir. Alüminyumda görülen korozyon çeşitleri;

1. Üniform korozyon
2. Oyuklanma korozyonu
3. Tanelerarası korozyon
4. Tabakalaşma korozyonu
5. Gerilmeli korozyon
6. Kurtçuk korozyonu
7. Aralık korozyonu
8. Erozyon
9. Mikrobiyolojik korozyon
10. Galvanik korozyon

Korozyon metale, ortama ve kullanım koşulları gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Alüminyum ve alaşımlarına ait özel bir korozyon çeşidi yoktur.

5.2.1. Üniform korozyon

Üniform korozyon mikrometre ölçeğinde çok küçük yarıçaplı oyuklar şeklinde oluşur ve metalin tüm yüzeyinde homojen bir azalmayla sonuçlanır. Bu korozyon çeşidi doğal oksit filminin çözünabilirliğinin yüksek olduğu yüksek asidik veya alkalın ortamda gözlenir.

Filmin çözülme hızı oluşum hızından daha hızlıdır fakat hızlarının birbirine oranı zamanla değişir. Örneğin, sodyum hidroksit çözeltisinde çözülme hızının yirmi günün üzerinde yapılan testlerde azaldığı görülmüştür.

Ortamdaki asit veya bazın özelliğine bağlı olarak çözünme hızı yılda birkaç mikrometreden saatte birkaç mikrometreye kadar değişebilir. Ancak bu hız uygun inhibitörlerle düşürülebilir. Örneğin, sodyum silikat alkalın içerisinde çözünme hızını büyük oranda düşürür. Üniform korozyon hızı, kaybolan kütle miktarının ölçülmesi veya açığa çıkan hidrojen miktarıyla belirlenebilir [8].

5.2.2. Oyuklanma (pitting) korozyonu

Çok sayıda klorür iyonlarının varlığında oluşan bölgesel bir korozyondur. Oksit tabakasının zayıf bölgelerinde oluşur. Metal yüzeyinde düzensiz oyuklar şeklinde açığa çıkan bölgesel korozyon çeşididir. Oyuk çapı ve derinliği metal, ortam ve servis koşulu ile ilgili parametrelere bağlıdır. Alüminyum nötr pH'a yakın ortamlarda oyuklanmaya meyillidir. Bu ortamlar su, deniz suyu ve nemli hava gibi tüm çevresel koşullardır. Diğer metallerin aksine alüminyumda oyuklanma korozyonu dikkat çekicidir çünkü oyuklar beyaz, çok miktarda ve jelimsi alümina jel $Al(OH)_3$ kabarcıkları ile kaplıdır. Bu kabarcıklar oyuklardan çok daha büyüktür. Oyuklanma korozyonu metalin su, deniz suyu, yağmur suyu ve nemli ortam gibi sulu bir ortama konulmasında gerçekleşir. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki oyuklanma korozyonunun ilerlemesi korozyonun açığa çıktığı ilk haftalarda olmaktadır [8].

Oyuklanma korozyonu çok ciddi bir konudur ve uzun yıllar geniş çalışmaların yapılmış olmasına rağmen bugün bile hala mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Oyuklanmanın hangi koşullar altında başladığı, ilerlediği ve nasıl yavaşlatılacağı bilinmemektedir.

Tüm pasif metallerde olduğu gibi pasif filmin bölgesel olarak bozulması halinde alüminyum bölgesel korozyona meyillidir. Bu durumda uygun koşullarında olması halinde oyuklanma

şeklinde sonuçlanır. Oyuklanma korozyonun elektrokimyasal mekanizması çok karmaşıktır ve tam olarak anlaşılamamıştır. Oyuklanma korozyonu oluşum ve ilerleme şeklinde iki farklı basamak gösterir.

Oyuklanma korozyonunun başlangıç basamağı

Oyuklanma korozyonu klorun olması halinde oluşmaktadır. Cl^- iyonları doğal oksit filme adsorbe olur ve filmin zayıf olduğu noktadan filmin kopmasına sebep olarak birkaç nanometre genişlikte mikro çatlaklar oluşturur. Çoğu oyuk çok kısa bir süre içinde oluşur. Fakat çoğu oyuk birkaç gün içerisinde duracaktır. Polarizasyon çalışmaları oyukların büyümesi durduğunda tekrar pasifleşeceğini göstermiştir. Metal bir kez daha polarize olduğunda pasifleşmiş oyuklar tekrar gelişemeyecektir ancak oyuklanmalar yeni bölgelerden başlayacaktır [8].

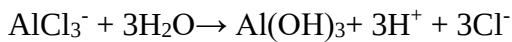
Katot bölgesinde oksijen yavaşça indirgenecektir. Bu bölgede oksit tabakasının altında intermetalik fazlar görülür. Film çatladığı yerde alüminyum hızla oksitlenecek ve AlCl^{-4} oluşacaktır.

Oyukta $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ reaksiyonuna göre alüminyum oksitlenir.

Oyuğun ağzında ise $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ reaksiyonunca oksijen indirgenir.

Oyuktaki metal korozyona uğrarken sıvıda çözünen oksijeni tükenecektir. Bölgenin geometrisi difüzyonu sınırlayana kadar oyuktaki oksijen Al^{3+} iyonlarının artışıyla tükenecektir. Bu olay klorür iyonlarının aralık bölgeye akışına neden olur. Aralığın küçük hacmi dolayısıyla buradaki ortam hızlıca 2-3 pH değerine ulaşarak asidik hale gelir.

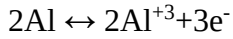
Alüminyum klorür aşağıdaki reaksiyone göre hidrolize olur;



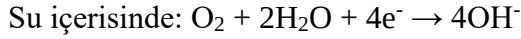
Oyuklanma korozyonunun gelişme basamağı

Oluşan oyuklar kısa süre zarfında iki elektrokimyasal reaksiyona göre gelişmeye devam edecektir.

Anottaki oyuğun tabanından oluşan oksidasyon reaksiyonu;

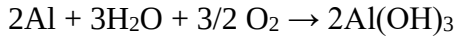


Oyuğun dışında oluşan katottaki indirgenme reaksiyonu;

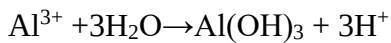


Anot kararlı ve bölgesel ise korozyon delik oluşturacaktır. Bu delik oyuk olarak adlandırılır. OH^- iyonlarının oluşumu veya H^+ iyonlarının tüketimi OH^- iyonlarının bölgesel olarak artmasına sebep olacaktır ve bazik pH'a sebep olacaktır.

Oyuklanma korozyonunun genel reaksiyonu aşağıdaki gibidir;



Oyuğun tabanında Al^{3+} iyonlarının oluşması neticesinde alüminyumun çözünmesi Cl^- iyonlarını oyuğun tabanına taşınmasını sağlayan elektrik alanı yaratır. Çözelti kimyasal olarak nötrleşir ve alüminyum klorürler oluşur. Cl^- iyonları bu reaksiyonlarda yer alan iyonlar arasında en hareketli iyondur. Alüminyum klorürlerin hidrolizi aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir;

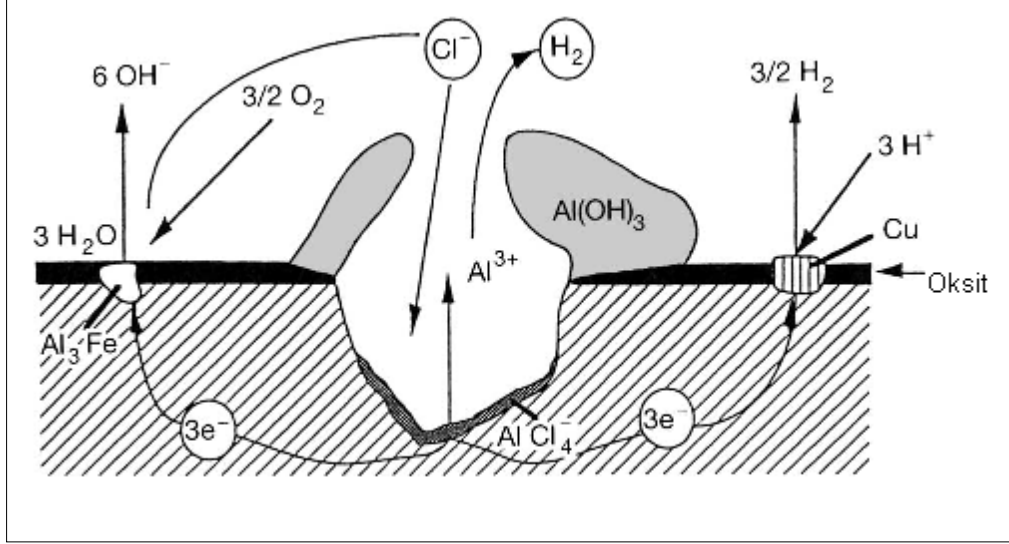


Bu reaksiyon oyuğun tabanında asitleşmeye neden olarak pH değerini üçün altına kadar indirger. Ortam asitleşerek oyuğun kendiliğinden gelişmesine neden olur.

Al^{3+} iyonları oyuğun tabanında yüksek konsantrasyona ulaşarak daha alkalın bir ortam olan oyuğun açıklığına doğru difüze olurlar. Özellikle bu ortam katodik reaksiyonların bazikleştirdiği yan yüzeylerde bulunur.

$\text{Al}(\text{OH})_3$ çökelecektir ve H^+ iyonlarının indirgenmesiyle meydana gelen mikro hidrojen köpükleri oluşan alüminyum hidroksitleri oyuğun ağzına iterek beyaz küçük kabarcık birikintileri oluştururlar. Korozyon ürünlerinin oyuğun tepesinde toplanması oyuğun girişini bloke eder. Bu olay iyonların değişimini engelleyerek oyuklanmanın neden yavaşladığını ve

durduğunu açıklar. Şekil 5.4'te alüminyumun oyuklanma korozyonu resimli olarak açıklanmaktadır [8].



Şekil 5.4. Alüminyumun oyuklanma korozyonunun mekanizması [8]

5.2.3. Tanelerarası ve tane içi korozyon

Metal içerisinde korozyon tane seviyesinde tüm yönlerde veya tercihli yolları takip etmek suretiyle iki farklı yolla ilerleyebilir. Korozyonun tüm yönlere yayılması halinde korozyon yönden bağımsız olarak tüm yapıyı etkiler. Tane içinde ilerlediği için tane içi korozyon olarak adlandırılır.

Tercihli yolları takip etmesi halinde korozyon tane sınırlarında ilerliyor demektir. Tane içi korozyondan farklı olarak metal miktarındaki kaybı azdır. Bu tip korozyon Tanelerarası korozyon olarak adlandırılır. Bu korozyon çıplak gözle tespit edilemez ancak 50 büyütme gibi mikroskop kontrollerinde belirlenir. Tanelerarası korozyonun tanenin içine nüfuz etmesi halinde özellikle uzama gibi mekanik özelliklerin düşüşüne neden olarak parçanın kırılmasına neden olur. Tanelerarası korozyonun ilerlemesi oyuklardan başlar. Tanelerarası korozyonun nüfuziyet derinliğiyle oyukların yarıçapı arasında bir ilişki yoktur. Kısacası Tanelerarası korozyon çok küçük, yüzeysel oyuklardan dahi gelişebilir.

Tanelerarası korozyon intermetalik fazların çökeldiği tane sınırlarıyla tane içi arasındaki elektrokimyasal potansiyel farktan kaynaklanmaktadır. Tane veya matris katı çözelti ve çökelmiş intermetalik fazlar içerir. Oda sıcaklığında alüminyumdaki demir, nikel veya

magnezyumun çözünürlüğü çok düşüktür. Katı eriyik alaşımsız 1050'ye yakın potansiyele sahiptir. Fakat katı eriyik doyurulduğunda ya da ortam sıcaklığında zenginleştirildiğinde potansiyel alaşım elementlerinin konsantrasyonuna bağlıdır [8].

İntermetalik bileşiklerin çözünme potansiyeli alüminyumdan farklıdır. Çizelge 5.3'te katı eriyik ve intermetalik fazların çözünme potansiyelleri gösterilmiştir. İntermetalik bileşikler;

- Katı çözültiden az elektronegatiflikte (Al_3Fe , Al_2Cu): Katı çözültiye nazaran katodiktir, tanelerarası korozyon halinde katı eriyik çözülür.
- Katı çözültiden fazla elektronegatiflikte ($MgZn_2$, Al_3Mg_2 ve Mg_2Si): Katı çözültiye nazaran anodiktir, Tanelerarası korozyon halinde intermetalikler çözünecektir.

Çizelge 5.3. Katı eriyik ve intermetalik fazların çözünme potansiyeli ($NaCl+H_2O_2$ çözeltisinde)

Katı eriyik	Çözünme potansiyeli mV SCE	İntermetalik faz
	- 170	Si
	- 430	Al_3Ni
	- 470	Al_3Fe
$Al-4Cu$	- 610	
	- 640	Al_2Cu
$Al-1Mn$	- 650	
1050A	- 750	
	- 760	Al_6Mn
$Al-3Mg$	- 780	
$Al-5Mg$	- 790	
$Al-1Zn$	- 850	
	- 910	Al_2CuMg
	- 960	$MgZn_2$
$Al-5Zn$	- 970	
	- 1150	Al_3Mg_2
	- 1190	Mg_2Si

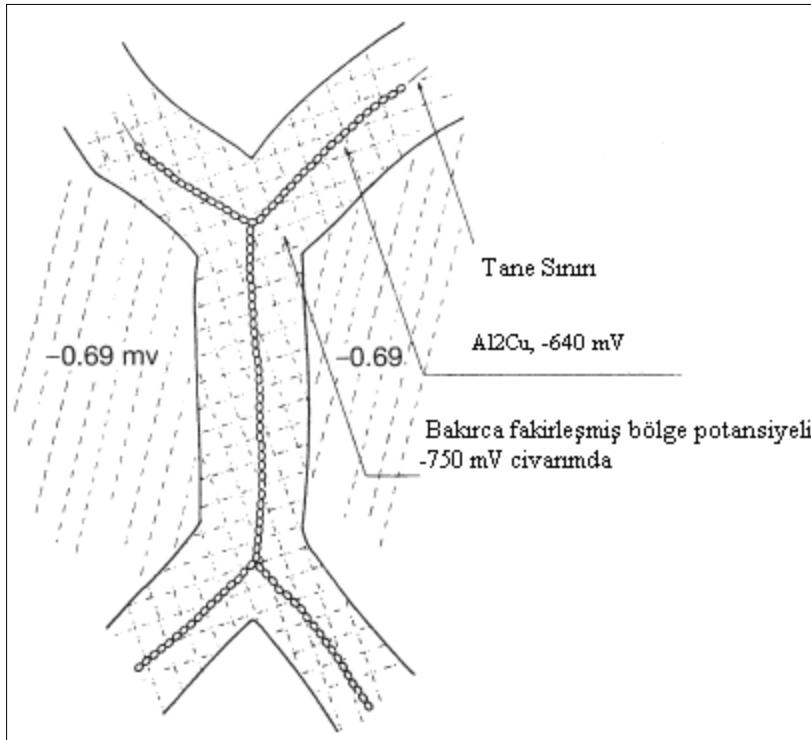
Tanelerarası korozyon korozif ortam varlığında, intermetalikle katı eriyik potansiyelleri arasında 100 mV mertebesinde fark olduğunda (Bu yüzden Al_3Mn ile Tanelerarası korozyon olmaz) ve intermetaliklerin sürekli çökmesinde oluşur.

Çökellemeyle sertleşebilen alaşımlarda intermetalik çökeltilerin boyutu ve dağılımı su vermeye ve yapay yaşlandırma koşullarına bağlıdır. İntermetaliklerin tane sınırlarında

sürekli çökmesi böylece önlenabilir. Alüminyum alaşımlarında anodik fazın veya katodik fazın çökmesi gibi iki farklı durum oluşabilir [8].

Anodik Fazın Çökmesi: Magnezyumun %3,5'ten fazla olduğu 5xxx serisi alaşımlarda anodik fazın çökmesi görülür. Uzun süreli ısıtmada β - Al_3Mg_2 fazı tane sınırlarında çöker. Bunun çözünmesi (-1150 mV) katı eriyiğe göre (-780 mV) oldukça anodiktir. Uygun şartlar altında yani korozif ortamın varlığında tanelerarası korozyon oluşur.

Anodik Bölgenin Oluşumu: 2024 gibi %4 bakır içeren 2xxx serisi alaşımlarda çökelmiş anodik bölge oluşur. Soğutma hızı çok düşük olduğunda intermetalik faz Al_2Cu (-640 mV) tane sınırlarında çökecektir. Bu faz bakır atomlarından oluşur ve tane sınırlarına yakındır. Bu yüzden civar bölge bakırca fakirleşecektir. Bakırca fakirleşmiş katı eriyik ise -750 mV potansiyele yakındır ve tane sınırlarına göre anodiktir. Şekil 5.5'te tane sınırlarında katodik fazın çökelmiş olduğu 2024 alüminyum alaşımının mikro yapısına ait örnek gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Tane sınırlarında katodik fazın çökmesi [8]

Taneler arası korozyona uygun koşullar altında bakırca fakirleşmiş bölge tane sınırlarına paralel bir yol boyunca çözülecektir. Genel olarak, çökelmeyle sertleşebilen alaşımlarda

korozyona yatkınlık mikro yapıya ve ısıtıl işlem koşullarına bağılıdır. T3 ve T4 ısıtıl işlemlerinin korozyona yatkınlığı T6 ısıtıl işlemine nazaran azdır. Ayrıca T73 ısıtıl işlemiyle de taneler arası korozyona karşı direnç artışı sağlanır. Çökelmeyle sertleşebilen alaşımların taneler arası korozyonu uygun ısıtıl işlemlerle kontrol edilebilir;

- Yüksek soğutma hızı
- 2xxx serisi alaşımlar için uzun yaşlandırma süreleri
- 7xxx serisi alaşımlar için çift yaşlandırma (T73)

5.2.4. Tabakalaşma korozyonu

Tabakalaşma korozyonu hadde veya ekstrüzyon yönüne paralel olarak ilerleyen çok sayıda düzlem boyunca oluşur. Bu düzlemler arası çok incedir ve korozyon ürünlerinin kabarması ile yavaş yavaş yukarı itilerek bir kitabın sayfası gibi soyulur. Bu yüzden tabakalaşma terimi kullanılır. Metalin şişmesiyle bu korozyonun yol açtığı en son boyuta ulaşılır.

Tabakalaşma korozyonu, 2xxx ve 5xxx serisi gibi şekil değiştirme yönüne paralel uzun taneli yapı gösteren alaşımlarda tanelerarası korozyon şeklinde gözlenebilir. 7xxx serisi alaşımların bakırlı ve bakırsız tiplerinde de görülebilir. Korozyon Al_6Mn , $Al_{12}CrMn$, $AlFeMn$ gibi katı eriyiğe nazaran katodik uzamış intermetalik fazların çökmesinden kaynaklanır [8].

5.2.5. Gerilmeli korozyon

Gerilmeli korozyonu eğme, çekme gibi mekanik gerilim ve korozi ortamının birleşmiş etkisiyle gerçekleşmektedir. Bu parametreler tek başına metalin dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip değil iken birlikte büyük zararlar verebilmektedirler.

1922 yılında Rawdon tarafından alüminyum alaşımlarının gerilmeli korozyona yatkınlığı açıklanmıştır. Rawdon aynı zamanda Al-Cu alaşımlarında gerilmeli korozyon ile tanelerarası korozyon arasındaki ilişkiyi de kurmuştur. 2xxx ve 7xxx serisi gibi yüksek mekanik dayanıma sahip alaşımlar ve 5xxx serisindeki yüksek magnezyumlu alaşımlar (%7'den yüksek) gerilmeli korozyonuna duyarlıdır.

Gerilmeli korozyonun mekanizması birçok çalışmanın konusu olmuştur. Alüminyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlaklarının ilerlemesi tane sınırları boyunca gerçekleşir. Bu tip korozyon mekanik gerilmenin tane sınırları boyunca çatlak ilerlemesini hızlandırdığı koşullarda tanelerarası korozyonun özel bir hali olarak düşünülür. Fakat bu görüş hatalıdır çünkü 6xxx serilerinde olduğu gibi mekanik gerilmenin olmadığı hallerde tanelerarası korozyona yatkın olan fakat gerilmeli korozyona yatkın olmayan alüminyum alaşımları vardır.

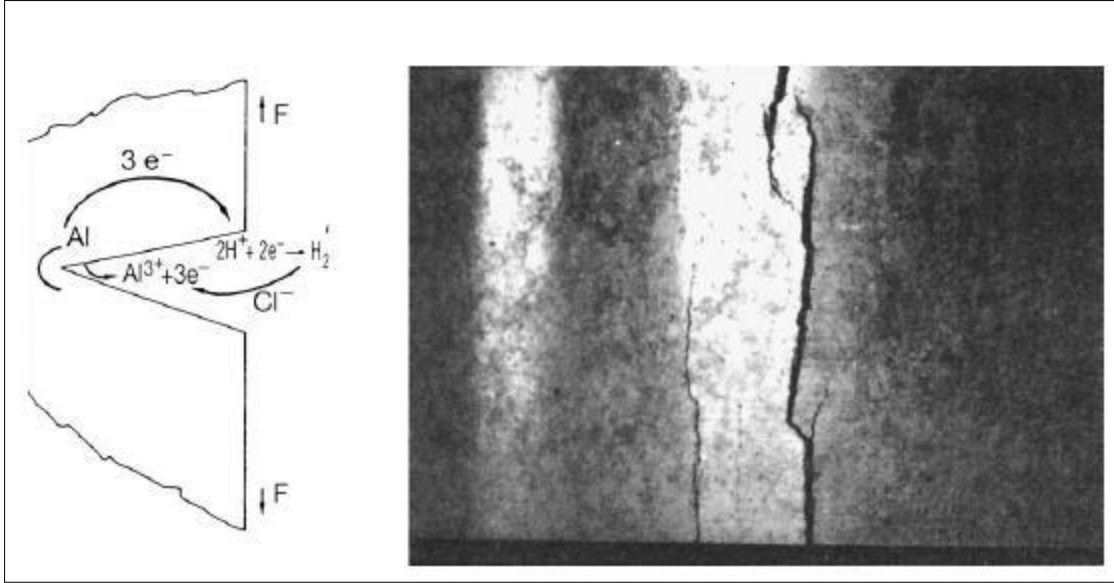
Havacılık sektöründe kullanılan yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının gerilmeli korozyonu özellikle 7xxx serisi alaşımları havacılık endüstrisine girdiği 50 ve 60'lı yıllarda birçok çalışmanın konusu olmuştur.

İki önemli mekanizma alüminyum alaşımlarındaki gerilim mekanizmasını açıklamaya yardımcı olur;

- Elektrokimyasal ilerleme
- Hidrojen kırılabilirliği

Elektrokimyasal ilerleme: 1932 yılında Brenner, 1944 yılında Mears, Brown ve Dix 2xxx ve 5xxx serisi Al alaşımlarında gerilmeli korozyonunun tanelerarası ilerleme teorisini geliştirmiştir. Korozyonun ilerlemesi elektrokimyasal mekanizmaya dayanır. Çatlak başladığında mekanik gerilimden kaynaklanan gerilim çatlağın tepe noktasında yoğunlaşır. Tepe noktasında çatlağın cidarlarına nazaran anodik olan bir bölge oluşur ve bu bölgede film yeniden oluşarak katodik bölgenin oluşumunu sağlar. Şekil 5.6'da gerilmeli korozyon çatlağı resimli olarak izah edilmiştir [8].

Sulu ortamda çatlak bir korozyon hücresi oluşturur. Oluşan bu pil hücresinde çatlağın tepe noktası anottur. Anot tükenirken çatlak ilerlemesi gerçekleşir. Çatlak ilerledikçe doğal filmin hızlıca tekrar oluşması için gereken şartlar azalacaktır. Bu da çatlak ilerleme hızını artıracaktır.



Şekil 5.6. Gerilmeli korozyon çatlağı, elektrokimyasal ilerleme [8]

2xxx ve 5xxx serisi alaşımlarda gerilmeli korozyonu sadece yüksek miktarda klorit içeren ortamda gelişir. Düşük klorit seviyeli suda veya nemli atmosferde oluşmaz. Deniz atmosferinde bu alaşımlarda taneler arası korozyon ve gerilmeli korozyon arasında iyi bir ilişki kurulmuştur. Pratikte 2xxx serisi alaşımların hem gerilmeli korozyona hem de taneler arası korozyona yatkınlığı yoktur.

Hidrojen kırılganlığı: Elektrokimyasal teori tüm alüminyum alaşımları için geçerli değildir. 6xxx serisi alaşımlar taneler arası korozyona yatkın iken gerilmeli korozyona yatkın değildir. Diğer yandan 7xxx serisi alaşımlar gerilmeli korozyona yatkın iken taneler arası korozyona değildir. 1960'ların sonuna kadar hidrojen kırılganlığının alüminyum alaşımlarına uygun olmadığı aşağıdaki iki sebepten ötürü düşünülüyordu;

- Çok yüksek basınçta bile alüminyumda hidrojen kaynaklı kırılma oluşmaz. Kuru hidrojen ortamında alüminyum çelikte olduğu gibi kırılma hassasiyeti göstermez.
- Hidrojenin alüminyumdaki çözünürlüğü ve difüzyon hızı çok düşüktür.

Yukarıdaki bu görüşler AlZnMg alaşımının nemli atmosferde gerilmeli korozyona yatkınlığı görülünce aşılmıştır. Bu kırılganlık metalde hidrojenin varlığından kaynaklanmaktadır. Aslında üretim sırasında hidrojen metal içerisine korozyon sırasındaki indirgeme sırasında metal oksit film arayüzeyinden nüfuz edebilir. Çatlağın tepe noktasında alüminyum doğal

oksit film ile kapalı değildir. Su ile reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan hidrojen tane sınırlarında yoğunlaşır ve tanelerarası ayrılma meydana gelir [8].

Genel hallerde gerilmeli korozyona direnç aşağıdaki ısıtıl işlem koşullarında daha yüksektir;

- TX51: T451 ve T651 ısıtıl işlemlerinde yarı mamul su verme sonrası (T451) veya su verme ile yaşlandırma arasında çekilir. Uygulanan toplam gerilim şekil değişiminden kaynaklanan iç gerilim ve servis koşullarından kaynaklanan gerilimin toplamına eşit olana kadar çekilir çünkü yarı mamulleri iç gerilimleri halleriyle kullanmak oldukça risklidir.
- T73 aşırı veya çift yaşlandırılmıştır [8].

5.2.6. Kurtçuk korozyonu

Bu korozyon boyanmış metallere özgüdür. Aslında bu korozyon yüzeyin görünüşünün değişimidir. Altındaki metal birkaç mikron derinliği geçmeyen çok yüzeysel bir atağa maruz kalır. 0.1-0.5 mm genişliğinde ve birkaç mm uzunluğunda dar iplikçikler şeklinde metal-boya ara yüzeyinde ilerler. Korozyon ürünlerinin kabarması boyayı deforme ederek boyanın altında çok dar iplik şeklinde, boyanın altında bir köstebeğin kazmış olduğu tünele benzer bir ilerleme gösterir. Airbus A320 tipi bir uçağın gövde üstünde tespit edilmiş kurtçuk korozyonuna ait fotoğraf şekil 5.7’de görülmektedir.

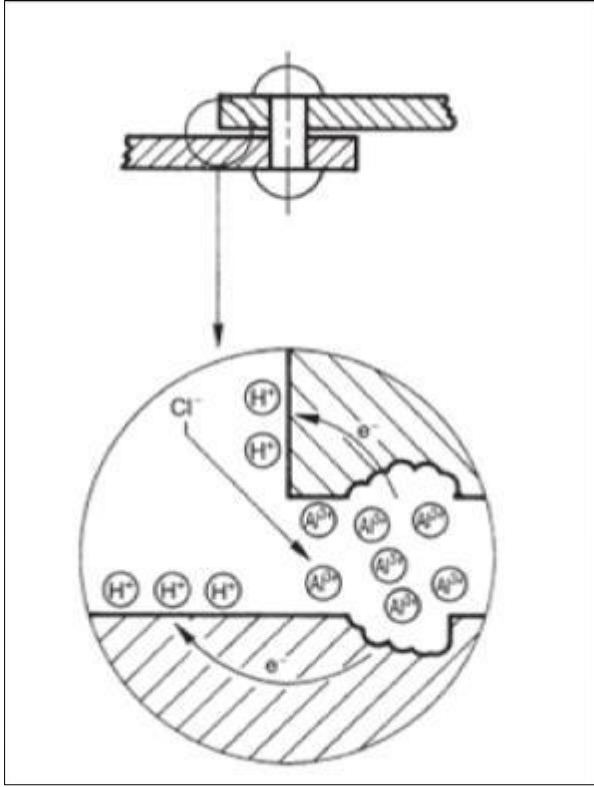


Şekil 5.7. Airbus A320 uçağının gövde üstündeki kurtçuk korozyonu

Kurtçuk korozyonu her zaman boyanın hasara çizik veya keskin köşe, delik gibi zayıf noktalardan başlar. Servisten birkaç yıl sonra görülebilir. Kurtçuk korozyonu ilk olarak 1944 yılında boyalı çelik üzerinde daha sonra havacılıkta kullanılan yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında görülmüştür [8].

5.2.7. Aralık korozyonu

Aralık korozyonu üst üste binen parçalarda, bağlantıların altındaki bölgelerde ve çeşitli kalıntıların altında oluşur. Bu bölgeler (aralık diye adlandırılır) çok küçük ve sulu sıvının geçişini zorlaştırır. Aralık bölgede elektrokimyasal reaksiyon oluştuğunda sıvının bileşimi değişecektir. Sonuçta; çözünme potansiyeli daha elektronegatif olur ve oyuk yüzeyi yapının diğer bölümlerine göre anodik hale gelir. Şekil5.8’de aralık korozyon hücresi görülmektedir.



Şekil 5.8. Aralık korozyonu [8]

5.2.8. Erozyon

Korozyon kaynaklı erozyon hareketli ortamda meydana gelir. Bu korozyon sıvının akış hızıyla ilgilidir. Metalin bölgesel olarak incelmesine neden olarak akış yönüyle aynı doğrultuda çizilmelere, çukurlara ve oluklara neden olur. Alüminyumda erozyondan kaçınmak için özel önlemler alınmaz diğer metallerdeki önlemler uygulanır [8].

5.2.9. Mikrobiyolojik korozyon

Metalin mikrobiyolojik korozyonuna aşağıdakiler sebep olabilir;

- Gelişmek için organik bir kaynağa ihtiyaç duyan heterotrof bakteri organik içerikli maddeleri sindirebilirler. Bu maddeleri karbondioksit, organik aside çevirir. Bu maddeler de ortam koşullarını değiştirerek korozyona neden olur. Kısacası bakterinin kendisi değil ortam koşullarındaki değişiklikler korozyona sebep olur.

- İnorganik elementlerin varlığında gelişen ototrof bakteri kimyasal ya da elektrokimyasal reaksiyonlarla enerji alırken korozyona neden olur. Alüminyum ve alaşımları için bilinen ototrof bakteri yoktur.

Alüminyumda en iyi bilinen tek mikrobiyolojik korozyon vakası uçaklardaki yakıt tanklarındadır. 1950'li yıllarda Amerikan hava kuvvetleri yakıt tanklarındaki ilk korozyon vakasını tespit etmiştir. Yakıt tamamen susuz değildir. Her zaman 25 °C'de 75 ppm nem kalıntısı içerir. Uçak yakıtı kerosenden ayrılarak tankın yüzeyinde birikir. Tahliyesi oldukça zor olan bu nemli ortam korozyona neden olur. Yakıt mikroorganizmalar içerir ve bu ortamda besin bulurlar. Uçak yakıt tanklarındaki korozyonun ana nedeni kerosendeki 'cladasporun resinae' bakterisinin büyümesidir.

Korozyon, yakıt-su arayüzeyinde oyuklanma olarak başlar. Diğer korozyon tipleri gibi elektrokimyasal reaksiyon ile oluşur. Bakteri nedeniyle meydana gelen kerosenin oksidasyonunda organik asit açığa çıkar ve ortamın pH'ını değiştirir. Mikrobik birikintiler bölgesel asitleşme dolayısıyla anodik bölgeler oluşturur. Oksidasyon reaksiyonu kerosen ve sudan çözünen oksijeni tüketir.

Bakterinin içerdiği enzimler tercihli olarak 7075 Al alaşımında bulunan çinko ve magnezyuma saldırır. Uçak yakıt tanklarındaki mikrobiyolojik korozyonun suda çözülebilen strontium kromat veya kerosende çözülebilir mono etilen glikol gibi bakteri öldürücüler kullanılır. Özellikle çok sayıda bakteri içeren deniz suyu gibi sulu ortamda alüminyumun mikrobiyolojik korozyonuna ait özel bir hal yoktur [8].

5.2.10. Galvanik korozyon

İki farklı metalin iletken bir sıvıda direk temas halinde bulunması halinde iki metalden biri korozyona uğrayacaktır. Bu olguya galvanik korozyon denir. Galvanik korozyon, aynı sıvıda metaller ayrı olarak yerleştirildiğinde meydana gelecek korozyondan yoğunluk ve çeşit açısından farklıdır.

Diğer korozyon çeşitlerinden farklı olarak galvanik korozyon metalin karakterine ve ısı işlemine bağlı değildir. Galvanik korozyon herhangi iki metalin iletken bir sıvıda temas halinde bulunmasıyla başlayabilir.

Galvanik korozyonun görünümü oldukça farklıdır. Oyuklanma korozyonu gibi yayılma göstermez ancak diğer metal ile temas bölgesinde oldukça yoğun gözlenir. Alüminyumun

korozyonu ovalleşmiş kraterler halinde gerçekleşir. Galvanik korozyondan etkilenen bölge yüzeyin diğer kısmına göre daha parlak görünüme sahiptir. Tüm alüminyum alaşımları galvanik korozyona maruz kalabilir bunun yanında 2xxx ve 7xxx alaşımlarında tanelerarası ve tabakalaşma korozyonu oluşabilir. Galvanik korozyonun oluşabilmesi için üç koşulun var olması gerekmektedir. Bunlar; farklı tip metaller, elektrolit, iki metal arasında elektriksel devamlılıktır.

İki farklı metal temas halinde olduklarında galvanik korozyon mümkündür. Daha fazla elektronegatif olan metal anot olarak davranır. Hangi metalin galvanik korozyona maruz kalacağını tespit etmek için metal ve alaşımlarının çözünme potansiyelleri karşılaştırılmalıdır. Temas halindeki metaller arasında en az 100 mV potansiyel farkı var ise galvanik korozyon gözlenir. Galvanik korozyonun yoğunluğu metaller arasındaki potansiyel farklılıkla ilişkili değildir.

İyonik iletkenliğin sağlanması için temas yüzeyinin sulu sıvıyla ıslanmış olması gerekmektedir. Aksi takdirde galvanik korozyon oluşmaz. Galvanik korozyon sıvı flor, sıvı amonyak ve yoğun nitrik asit gibi iyonik ortamlarda da oluşabilir.

Elektriksel devamlılık iki metal arası direkt temas ile sağlanabileceği gibi civata gibi bağlantı elemanı ile de sağlanabilir.

Galvanik korozyonun korunmasında anotlama etkin bir rol almaz. Galvanik korozyondan, iki metal birbirinden yalıtılarak, temas halindeki yüzeylerden tercihen katodik yüzey boyanarak, alüminyum civata kullanılarak galvanik korozyon önlenir [8].

6. UÇAKLARDA KOROZYONDAN KORUNMA VE ÖNLENMESİ

Uzun yıllar boyunca havacılık endüstrisinde korozyon ve korozyondan korunmanın önemi göz ardı edilmiş “bul ve tamir et” yaklaşımı baskın gelmiştir. Eski tip uçaklarda karşılaşılan korozyon kaynaklı hasarlar neticesinde yeni uçakların üretimleri ve tasarımında önemli gelişmeler yapılmıştır. Uçak üreticileri seneler boyu uçak tasarımında korozyona daha dayanıklı malzeme kullanımı, gelişmiş adhezif bağlanma prosesleri, üst üste bindirilmiş yüzeylerde ve perçin deliklerinde dolgu macunu kullanımı, uçak mutfak teçhizatlarındaki dökümlerin ve tuvaletlerdeki sıvıların kontrolü gibi birçok yenilikler uygulamışlardır. Uçakların üretimlerine ve korozyon tasarımına verilen önem neticesinde, yeni nesil uçakların servis süresi 20 yıldan 40 yıla çıkmıştır ancak bütün bu gelişmelere rağmen çeşitli konuların varlığı etkin korozyon kontrolünü engellemiştir. Yeni malzemelerin kullanılmasına rağmen bunları yeni tasarımlarda üretme tereddüdü vardır. Korozyona yatkın 7075-T6 ve 2024-T3 alaşımları, aynı dayanım ve yorulma özelliklerine sahip yeni korozyona dirençli alüminyum alaşımlarının olmasına rağmen hala geniş çapta kullanılmaktadır. Korozyon sürecini anlama eksikliğinden, korozyon başlangıcını ve büyümesini tahminin zorluğundan korozyona verilen önem yapısal sağlamlığa verilen önemin çok gerisinde kalmıştır. Bu sebeplerden korozyon daha çok ‘bul ve tamir et’ felsefesiyle kabul görmüştür. Bu görüş yapısal ve yapısal olmayan parçalarda oluşan korozyon neticesinde bakım masraflarını önemli miktarda arttırmıştır. Korozyon önleminin zamanında alınmadığı takdirde uçağın bütünlüğü etkilenmektedir. Ayrıca uçak gövdesinin yaşlanmasıyla birlikte korozyon, gövdenin yapısal bütünlüğünü daha da etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı gerek uçak üreticileri gerekse uçak operatörleri uçak servis süresi boyunca teknolojik gelişmeler çerçevesinde bir korozyon kontrol programına sahiptirler.

Yeni tip uçakların korozyon tasarımında önemli gelişmeler yapılmıştır. 25 yıllık süre çerçevesinde üreticiler birçok tasarım yenilikleri geliştirmişlerdir. Bu gelişmeler, 7075-T6 gibi korozyona yatkın malzemelerin değişimi, gelişmiş adhezif yapıştırma işlemleri, temas yüzeylerinde ve perçin deliklerinde dolgu macunu kullanımı, uçak mutfak ve tuvalet ekipmanlarından doğan sıvı saçılmalarının kontrolüdür. Diğer uçaklarda da buna benzer gelişmeler kaydedilmiştir.

Özellikle 1988 yılı 28 Nisan ayında Aloha havayollarına ait Boeing 737-200 tipi bir uçağın gövde sacının ayrılması sonucu dikkat çekmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde bu

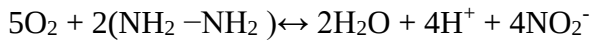
kazanın, gövde saclarının birleşim noktalarından ayrılması ve ayrılan bölgelerde yükün eşit dağılmaması sonucu yorulma çatlaklarının oluştuğu, ayrılmanın ayrıca korozyona neden olarak bağlantı bölgesinde hasara neden olduğu tespit edilmiştir.

Bu kazadan sonra yapılan çalışmalar neticesinde korozyondan korunma ve kontrol programları (CPCP) geliştirildi. Oluşturulan bu programlar neticesinde her tip uçak için korozyon korunması ve önlenmesi için operatörlerin uyması gereken asgari gereklilikler belirtilmiştir [10].

Alüminyum alaşımlarını korozyondan korumak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Temel fikir, metalik yüzeyi çevre ile temastan (nem, tuzlar, asitler, oksijen vb.) izole ederek alaşım yüzeyini pasifleştirmektir [11].

Korozyon önleyicileri: Korozyon önleyici, bir ortama küçük konsantrasyonlarda eklendiğinde korozyonu en aza indiren veya önleyen kimyasal bir maddedir. Korozyon inhibitörleri, depolama veya nakliye sırasında geçici koruma ve yerel koruma dâhil olmak üzere metalleri korozyondan korumak için kullanılır. Etkili bir inhibitör çevre ile uyumludur, uygulama için ekonomiktir ve düşük konsantrasyonlarda mevcut olduğunda istenen etkiyi üretir[12].

İnhibitör seçimi metale ve ortama bağlıdır. İnhibitörler, çevresel koşullandırıcılar ve arayüz inhibitörleri olarak sınıflandırılabilir. Çevresel koşullandırıcılar, ortamdaki aşındırıcı türleri uzaklaştırır ve agresif maddeleri temizleyerek ortamın aşındırıcılığını azaltır. Örneğin, nötre yakın ve alkali çözeltilerde hidrazin, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, oksijen indirgeme reaksiyonunda bir azalmaya yol açan oksijen içeriğini azaltmak için kullanılabilir [13]:



Arayüz inhibitörleri, metal / çevre arayüzünde bir film oluşturarak korozyonu kontrol eder. Anodik, katodik veya her iki elektrokimyasal reaksiyonu inhibe edip etmediklerine bağlı olarak katodik, anodik ve karışık inhibitörler olarak sınıflandırılabilirler. Anodik inhibitörler genellikle oksitler, hidroksitler veya tuzlar gibi idareli çözünür korozyon ürünlerinin oluştuğu nötre yakın solüsyonlarda kullanılır. Alaşım yüzeyini pasifleştirir ve anodik metal

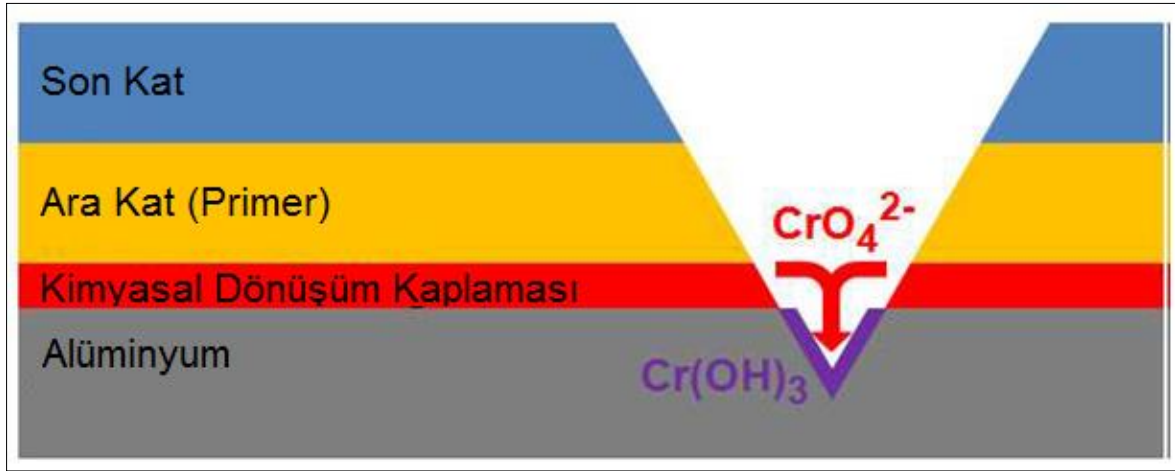
çözünme reaksiyonunu engeller. Fosfatlar, silikatlar ve boratlar gibi katodik inhibitörler, nötre yakın ve alkali çözeltilerde oksijen kimyasal emilimlerini bloke ederek ve veya oksijenin metal yüzeye difüzyonunu sınırlayarak katodik reaksiyon oranını düşüren koruyucu filmler oluşturur. Karışık inhibitörler, metal yüzey üzerinde fiziksel veya kimyasal olarak adsorbe olan veya polimerik bir film oluşturan çoğu organik bileşiktir.

Kaplamalar; kaplamaların metale uygulanması, korozyon kontrolünün en eski yoludur [14]. Boya filmleri ile korumanın basitçe metalin korozi ortamdan, özellikle su ve oksijenden izolasyonuna dayandığı varsayılmıştır [15]. Bununla birlikte, 1940'ların sonlarında birkaç başka antikorozi pigment tanıtılmış ve bu gelişmeler, kaplamalarla korozyon kontrolünün daha organize bir şekilde anlaşılmasına yol açmıştır [16]. Kaplamalarla korozyon kontrolü üç teknikte alt sınıflandırılabilir:

- i. Bariyer kaplama, iyonik filtre görevi görerek metal alt tabakayı korur. Boya filminin, anodik ve katodik bölgeler arasındaki akım transferini azaltmak için yüksek bir elektrik direncine sahip olmasını sağlar. Ek olarak, bariyer ayrıca metale oksijen taşınmasını engelleyebilir, böylece hızı azaltabilir ve katodik reaksiyonu engelleyebilir. İster bir iyonik filtre ile ister oksijen yoksunluğu ile koruma olsun, bir bariyer sisteminin temel gereksinimleri, kaplamanın iyonik parçalara ve oksijene karşı geçirimsiz olması ve ıslak servis koşullarında metal ile yapışmayı sürdürmesi gerektiğidir [14]. İyonik çözeltilere ve oksijene karşı geçirimsizliğin, bariyer filmlerin altındaki korozyon için hız belirleyici olduğu düşünülürken, filmin suya olan geçirgenliğinin genellikle korozyon üzerinde daha büyük doğrudan etkiye sahip olduğu ve daha sonra korozyona yol açtığı düşünülmektedir [12].
- ii. Anodik kaplama, metalden çevreye akım boşalmasını önleyerek bir metal alt tabakayı korur. Bu katodik koruma etkisi, daha anodik bir metalle (alüminyum ve alaşımlarını korumak için genellikle çinko) pigmentli bir film uygulanarak gerçekleştirilir. Anodik çinko tozu pigmentinin yükleri, filmin içinden ve arayüz boyunca (yani, anodik film ile katodik metal substrat arasında) sürekli bir akım akışı sağlayacak kadar yüksek olmalıdır. Tüm deşarj çinko pigmentte meydana gelir ve bu fedakâr pigmentlerin iletkenliği, kaplamadan çevreye akım akışını sürdürmek için yeterli olduğu sürece, substrat metal korunmuş olarak kalır [17].
- iii. İnhibe edici primerler, metal substratın pasivasyonu (veya inhibisyonu) elde edilebilecek ve muhafaza edilebilecek şekilde arayüz (astar / metal) ortamı değiştirerek korozyonu

kontrol eder. Bu durumda, astarın formülasyonu, kaplama filmindeki çözünür önleyici pigmentler, pasif (veya önleyici) filmler oluşturmak üzere reaksiyona girdikleri metale taşınabilecek şekilde kaplamanın nem geçirgenliğini destekler. Bu, (i) nispeten yüksek hacimde çözünebilir bir pigment konsantrasyonu ve filme yeterli su emilimi ve (ii) uygun pasivatör (pigmentler) / pasifleştirici (O_2 , iyonlar) oranlarına sahip bir iyonik geçirimsizlik gerektirir. Bu tasarım, daha sonra pasif filmlerin oluşturulabileceği astarın altındaki metal yüzeye taşınan pigment tarafından çözünür önleyici iyonların salınmasını sağlar, ancak pasifleştirici iyonların (klorür, sülfatlar, vb.) Çevreden filme çok az geçirgenliğini sağlar [18].

Havacılık endüstrisinde, korozyondan korunma için en etkili stratejilerden biri, çoklu kaplama sisteminin uygulanmasıdır. Son katlar genellikle astarların üzerine uygulanır ve ek hizmet sağlar, yani nem, oksijen ve iyonik türlere karşı daha iyi geçirimsizlik veya gelişmiş hava koşullarına dayanıklılık [11].



Şekil 6.1. Alüminyum alaşımlarını korozyondan korumak için kullanılan tipik bir çoklu kaplama sisteminin şeması

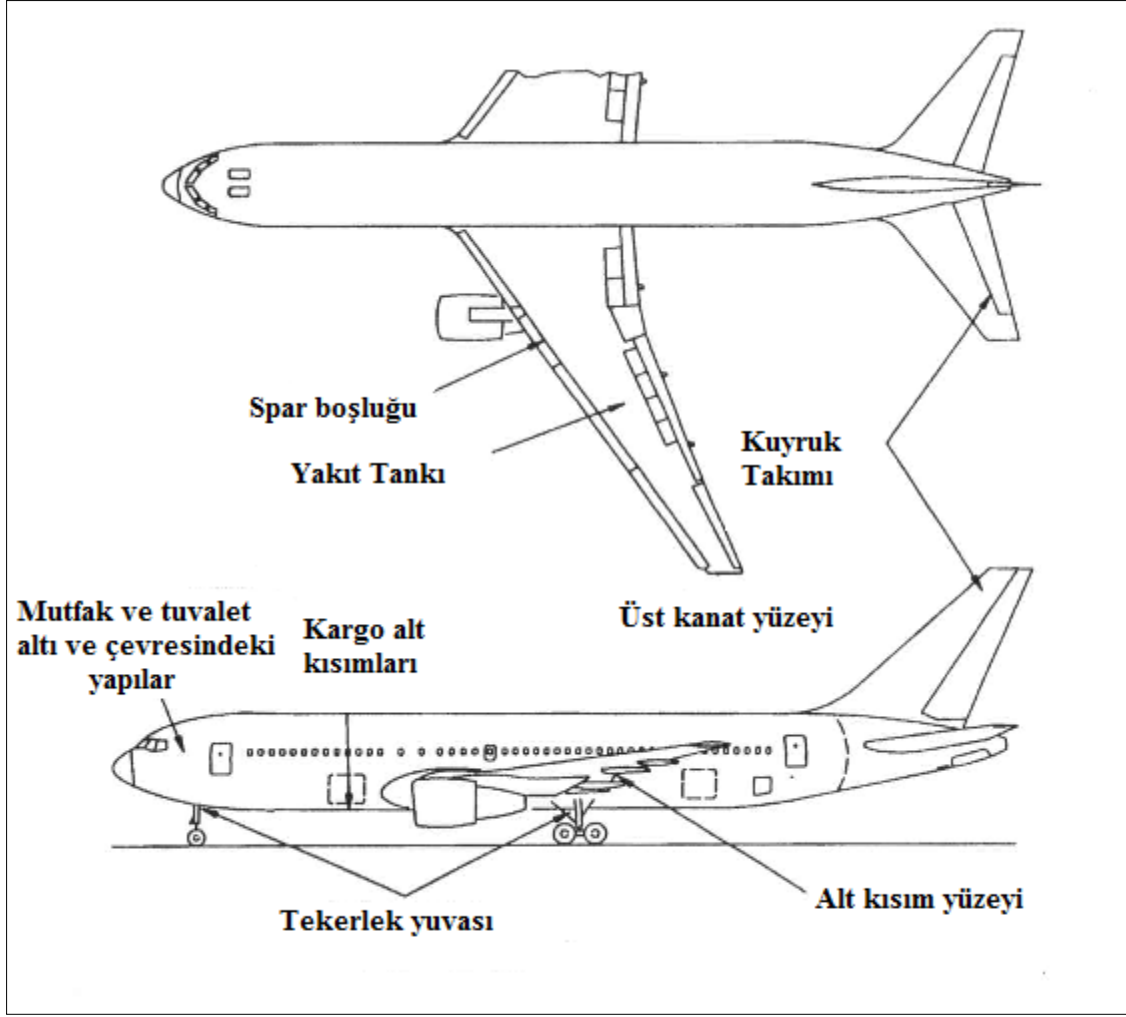
Dönüşüm kaplamasındaki kromat, CrO_4^{2-} , çizilen alana taşınarak ve pasifleştirici bir $Cr(OH)_3$ tabakası oluşturarak bu çoklu kaplama sisteminin kendi kendine iyileşmesini sağlar.

Bununla birlikte, inhibe edici primerler ve üst kaplamalar, polimer primerleri ile polar olan ve zayıf bir şekilde bağlanan doğal oksit tabakası nedeniyle, alttaki alüminyuma iyi yapışmaz ve onu korumaz. Bu nedenle, "dönüşüm kaplamaları", Şekil 6.1'de gösterildiği gibi

astarlar ve üst kaplamalarla etkileşim için metali uygun şekilde koşullandırmak için uygulanır. Bu tür kaplamalar korozyon inhibisyonu sağlar ve astarın yapışmasını destekler[18]. Alüminyum alaşımları ile yaygın olarak kullanılan dönüştürme kaplamaları, fosfat-, kobalt-, titanyum-, zirkonyum-, manganat-, silikat-, kromat- ve diğer nadir toprak bazlı sistemleri içerir. Hepsi sadece korozyona karşı bir savunma tabakası sağlamakla kalmaz, aynı zamanda organik astarların ve son katların istikrarlı bir performansı için gerekli olan yapışmayı da teşvik eden bir kaplama üretirler. Ayrıca uçakta servis sırasında çizilme meydana gelebilir. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, kendi kendini iyileştirebilen bir dönüşüm kaplaması içeren çoklu kaplama sistemi için, hareketli iyonlar (örneğin, CrO_4^{2-} , VO_4^{3-}), çizilen alana taşınır ve çözünmez bir oksit tabakası oluşturmak için indirgenir (örneğin, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, V_2O_3). Bu, aşınan yüzeyi pasifleştirir [19].

6.1. Uçaklarda Korozyona Neden Olan Faktörler

Ticari havaaraçlarında korozyona neden olan çeşitli etkenler bulunmaktadır. Korozyon oluşumu ilk olarak tasarımdan kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra malzeme seçimi, son işlemler ve yapısal düzenlemenin bir uçağın korozyon direncine önemli etkileri vardır. Tasarım aşamasında korozyon temelli tasarıma özen gösterilmelidir. Buna bağlı olarak korozyona dayanıklı malzeme seçimine dikkat edilmelidir ve farklı metallerin birbiri ile temasından, boşluklu yapılardan, gerilmelerden, zayıf tahliye sistemlerinden kaçınmak gerekmektedir. Ayrıca, uygun bağlayıcı malzeme ve son işlemlerin seçimi de korozyona dayalı tasarımda önemli bir noktadır. Örneğin; yeni nesil uçakların bağlayıcı elemanlarında ve temas eden yüzeylerde korozyon önleyici astar ve macun kullanımı sıklıkla kullanılan işlemlerdendir. Korozyona yatkın olan tüm birleşim bölgelerinde temas yüzeyi macunu kullanılarak korozyona neden olan boşluklardan kaçınılmaktadır. Korozyon önleyici bileşikler birçok uçak parçasının montajı sırasında rutin olarak kullanılır. Korozyonun sıklıkla görüldüğü bölgeler; gövde içi üst ve alt bölgeler, basınç bölmeleri, uçak tuvalet ve mutfak bölmelerinin alt kısımları, iniş takım yuvaları, kanat ve kuyruklar, kuyruk tork kutusu iç bölmeleri ve kaportaların alt kısımlarıdır. Şekil6.2'de uçaklarda korozyonun çok görüldüğü bölgeler gösterilmiştir.

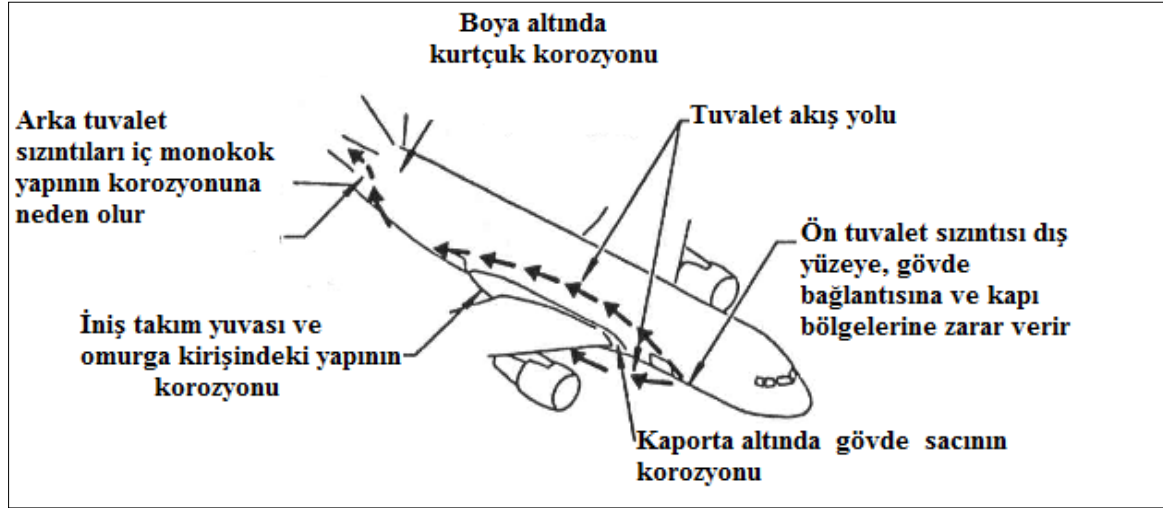


Şekil 6.2. Korozyonunun sık görüldüğü bölgeler

Korozyonun bir diğer kaynağı ise üretime dayanmaktadır. Genellikle, montaj ve son işlemler bir parçanın erken korozyona uğramasında etkin olur. Uygun korozyon korunmasının sağlanması için uygun yüzey ön işlemleri uygulanmalı ve kullanılacak koruyucu kaplama ve macunların uzun süre dayanıklılık sağlaması gerekmektedir.

Uçaklar operatörlerin kullanımındayken uçuş koşulları ve bakım işlemleri gibi birçok faktör uçakların korozyona uğrama sürelerini etkiler. Deniz ve tropikal atmosfer koşulları, yüksek nem ve endüstriyel kirlilik içeren hava koşulları uçağın özellikle dış yüzeyine karşı yüksek oranda korozyon etkiye sahiptir. Bununla birlikte, kullanım sırasında koruyucu yüzey işlemleri; çizilme, kopma, perçin çevresinde kırılma, aşınma ve eskime sebebiyle bozulmaktadır. Uçak içerisindeki çevresel koşullar ise daha ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Örneğin; uçak tuvalet ve mutfak ekipmanlarından yayılan döküntüler, kimyasal döküntüler, hayvan atıkları, mikrobik gelişim, yangın kalıntıları, tuzlu su gibi

korozif kargolar uçak içerisinde ciddi korozif ortamlar yaratabilirler. Uçak içindeki bu gibi etmenlerin varlığı uçak içi korozyonun en önemli kaynağıdır. Uçakların dış gövdelerinde korozyona uğrayan bölgeler Şekil 6.3’ de gösterilmiştir[20].

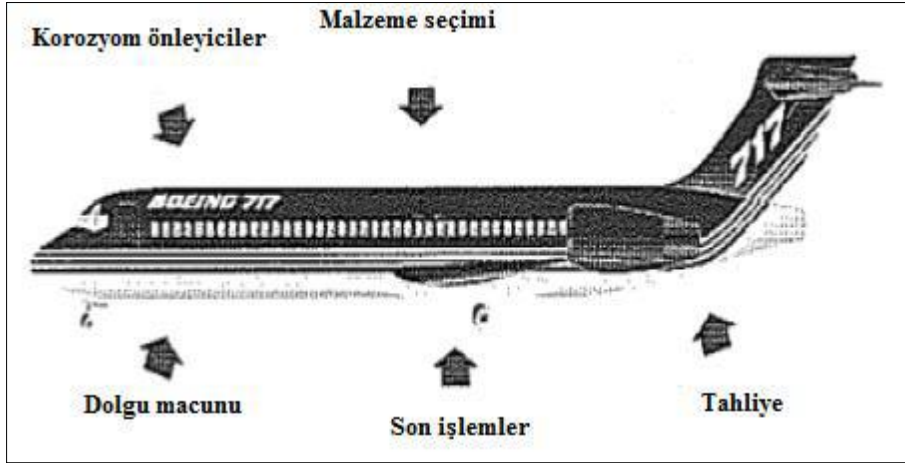


Şekil 6.3. Dış gövdede rastlanan korozyon bölgeleri

6.2. Korozyon Kontrol Yöntemleri

Korozyon kontrolü tasarım ve üretim aşamasında yapılabileceği gibi kullanım ve bakım sırasında da gerçekleştirilebilir. Korozyona karşı korunmak için yapılabilecek en basit yöntem korozyona duyarlı parçalara koruyucu kaplama uygulamak, ilgili parçalardan tüm nemi uzaklaştırmak, anodu katot malzemeden izole etmek ve elektroliti ortamdan uzaklaştırmak ve böylelikle korozyon hücresinin temel elemanlarını fonksiyonsuz kılmaktır [21].

Korozyon kontrolü için uygun tasarım; korozyona dayanıklı malzeme seçimi, kaplama, macun, uygun tahliyenin sağlanması, korozyon önleyici bileşikler gibi korozyon önleyici son işlemlerin seçimi ve uygulanmasını içermektedir. Şekil 6.4’te tasarım ve üretimde dikkat edilmesi gerekli parametreler gösterilmiştir. Ayrıca farklı metallerin birbiri ile temasından kaçınılmasına, bakıma elverişliliğe, korozyonlu yapıya kolay ulaşım imkânının sağlanmasına ve uçak içi çeşitli döküntüler ve nem için uygun tahliyeye özen gösterilmelidir [22].



Şekil 6.4. Korozyon engellemesinde önemli parametreler

6.2.1. Malzeme seçimi

Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranlarından ötürü uçaklarda geniş çapta kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımlar korozyona karşı oldukça yatkındırlar. Korozyon direncini arttırmak için bu alaşımlar yüksek saflıkta alüminyum ile kaplanır. Kaplama genellikle malzemenin toplam kalınlığının %2,5 ila %5'i arasında bir filmidir ve onu yalnızca korozyondan korumakla kalmaz, aynı zamanda çekirdek malzemeyi daha fazla korumak için galvanik bir etkiye sahiptir. Bu Al alaşımlarını yüksek saflıkta alüminyum ile kaplamaya kladlama denir.

Kladlı sac ve plaka Al alaşımları, tabakalaşma ve gerilmeli korozyon çatlağına dayanıklılık için çeşitli ısıt işlemlerle korozyon dirençleri artırılarak ağırlık ve işlevsel olarak izin verilen yerlerde kullanılırlar. Tabakalaşma korozyonuna karşı yatkın olmayan 7055-T7751 plakası kanat üstlerinde 7150-T651'in yerini almıştır. Ayrıca yapısal amaçlı olarak kullanılan çoğu Al alaşımlarına gerilmeli korozyon ve yorulma dirençlerini arttırmak amacı ile bilyalı dövme uygulanır [23].

6.2.2. Kaplama seçimi

Korozyona karşı korunmanın en pratik ve etkin yolu uygun kaplama uygulamasıdır. Al alaşımları için kaplama sistemi genellikle anotlanmış (eloksal) yüzey veya yüzey üzerinde kimyasal bir film oluşturmak için kullanılan kimyasal dönüşüm kaplamaları ile birlikte korozyon önleyici astar ve boya kullanımından oluşmaktadır. Uçakta sıklıkla kullanılan

anotlama işlemleri fosforik asit veya kromik asit ile anotlamadır. Bu filmin amacıastarın çok iyi yapışmasıdır [23].

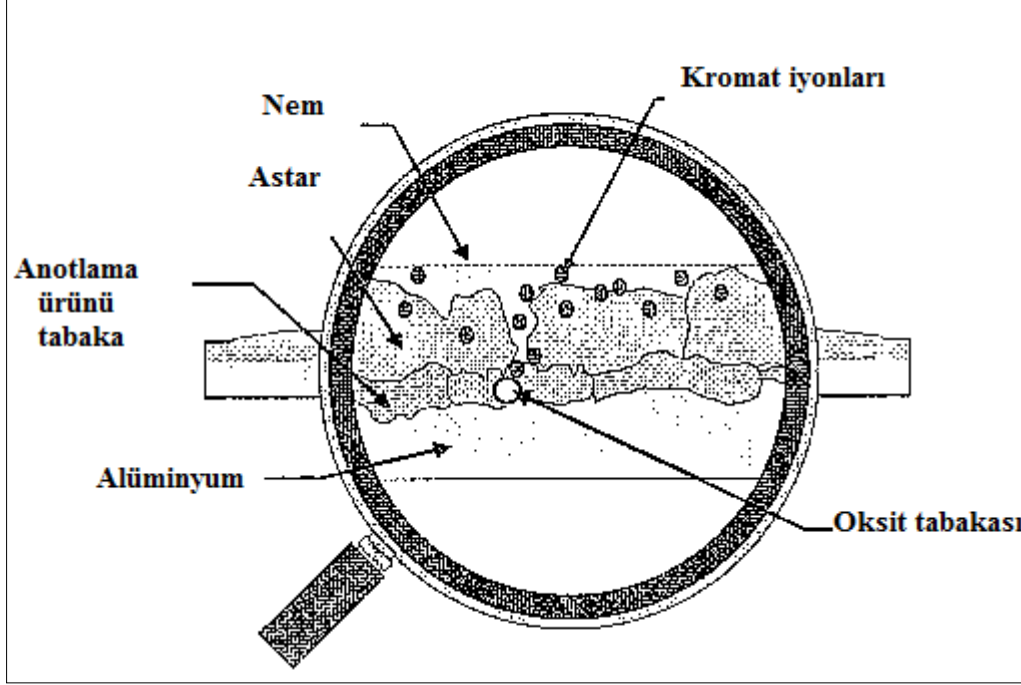
Alüminyum malzeme yüzeyine boya uygulanması malzemenin korozyon dayanımının arttırılması için gerçekleştirilir. Uçak alüminyum yüzeylerinde gövde içi korunmanın sağlanması için iki kat epoksi astar ile birlikte kladlanmış yüzeylerde kimyasal dönüşüm kaplama uygulanması, çıplak yüzeylerde ise kromik asit anotlama yapılmaktadır. Dıştan boyanacak yüzeylerde ise iç bölgelerde olduğu gibi kladlanmış yüzeylerde kimyasal dönüşüm kaplama ile yüzey işlemi veya çıplak yüzeylerde kromik asit ile anotlama işlemi yapılır ancak kullanılan astar malzemesi kurtçuk korozyonuna karşı dayanımı arttırılarak daha iyi korozyon koruması yapacak şekilde formüle edilmiştir. Bunlar haricinde korozyon koşullarının ağır olduğu yerlerde veya dekoratif işlemlerin gerektiği yerlerde ek kaplamalar kullanılır [23].

Genellikle nem ve koroziif kimyasallardan etkilenen tahliye bölgeleri, iniş takımı yuvaları, tuvalet ve mutfak teçhizatlarının alt bölgeleri gibi yerlerde kromik asit ile anotlanmış yüzey üzerine iki kat epoksi astar, astar üzerine de epoksi emaye kullanılır. Bu bölgelerdeki bağlantı kısımlarında ise dolgu macunu kullanılmaktadır[23].

Uçak kanat yüzeyleri ise sürekli suya ve havaya açık durumdadır. Bu bölgelerde öncelikli işlem kanat yüzeylerine kromik asit anotlama ve tek kat epoksi astar uygulamasıdır. Kimyasal işlem uygulandığı takdirde kimyasal dönüşüm kaplaması epoksi astar ile kullanılır. Daha sonra üst kanat yüzeyi iki kat polisülfat ile kaplanır. Alt kanat yüzeyleri ve spar boşlukları ise yumuşak üretan ile kaplanır. Kanatlarda kullanılan epoksi astar üretim sırasında oda sıcaklığında kür edilir. Bu astar korozyon dayanımı arttırmak için formüle edilmiştir ve tüm yakıt tankı yapısında bir veya iki kat kullanılır. Bu astar ile birlikte yüzey işlemi olarak kimyasal dönüşüm kaplaması veya anotlama kullanılmalıdır çünkü kür işlemi kimyasal dönüşüm kaplamasının diğer tipleri için uygulanamamaktadır. Kuyruk yapısında tahliye bölgeleri gibi yerlerde kromik asit anotlama ve iki kat epoksi astar kullanılır. Bazı uçak modellerinde ise üzerine ilave beyaz emaye kaplanır [23].

Astar ve anotlanmış tabaka, bazı uygulamalarda kimyasal dönüşüm kaplaması, nemin varlığı halinde serbest kalan kromat iyonları içerirler. Alüminyum metalini açıkta bırakacak şekilde bir çizik ve nemin olması halinde kromatlar açıkta kalan alüminyum ile reaksiyona girerek

çözülmeyen oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka nemin alüminyum ile temasını önleyerek korozyonu engeller. Şekil 6.5'te astar ve anotlamanın fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 6.5. Astar ve anotlamanın fonksiyonu

Açık alüminyum yüzeylerinde astar kullanımı korozyonun önlenmesinde önemli bir artış sağlar. Uçak üzerinde yapılan bir tamir sonrası bakım el kitaplarında optimum korozyon korunması ile ilgili tüm basamaklar belirtilmektedir. Bu prosedürlerden sapılması halinde uygulanan bitirici işlemlerin efektifliği düşerek korozyon riski artar ve yapısal bütünlüğü ciddi biçimde etkilenir. Uçağa uygulanan son işlemler yapıyı aktif olarak korozyon başlangıcından korur. Bununla birlikte bu işlemlerin yapıyı yüksek seviyede koruyabilmesi için hasara uğradıklarında yenilenmelidir [8].

Yapının korozyona uğradığı tespit edildikten sonra korozyonlu yüzey tıraşlandıktan ve bir çözelti vasıtasıyla temizlenmesi sonrası kullanılacak yere göre hazırlanan kimyasal dönüşüm kaplaması çözeltisi yüzeye uygulanır. Kimyasal dönüşüm kaplaması ilk uygulama sonrası kırılgan ve jelatimsidir. Dehidrate olmasıyla birlikte kaplanan kimyasal dönüşüm kaplama tabakası sertleşir. Astar uygulamasına geçilmeden önce kaplamanın tamamıyla kuru hale gelmesi için tavsiye edildiği üzere en az bir saat beklenmesi sağlıklı netice vermektedir [23].

Kimyasal dönüşüm kaplamaları

Kimyasal dönüşüm kaplamaları alüminyum yüzeyinde kimyasal bir film oluşturarak anotlanmış yüzey ile aynı görevi yapmaktadır. Oluşan film anodik işlemde oluşan filme göre daha yumuşaktır. Kimyasal dönüşüm kaplamaları 0,05-0,15 µm mertebesinde ince, karmaşık bir oksit tabaka oluşturur. Bu karmaşık oksit tabaka asidik, alkalın veya kromat banyolarda elde edilebilir. Tamiri yapılan bölgelerde ve iç kısımlarda kimyasal dönüşüm kaplamalarından kullanılır. Kimyasal dönüşüm kaplamaları toz halinde olup distile su ile polietilen, paslanmaz çelik veya benzeri kaplarda toz çözülene kadar karıştırılma sonrası çözelti bir saat bekletildikten sonra kullanılır. Çözeltiler düşük miktarlarda hazırlanır ve 24 saatten fazla beklemiş çözelti kullanılmadan atılır. Kimyasal dönüşüm kaplamalarından en çok kullanılanı kromat-fosfat uygulamalarıdır. Kimyasal dönüşüm kaplamaları ile kaplanacak yüzeyler solvent veya yağ sökücü ile iyice temizlendikten sonra bez veya hava ile kurutulduktan sonra pamuk bez veya naylon ile kaplama uygulanır. Yaklaşık 30 saniye ıslak yüzeyde altınimsı bir renk oluşana kadar ovulur. Daha sonra yüzey temiz su ile temizlenir ve pamuk bez ile kurulandıktan sonra 1 ila 3 saat yüzeyin kuruması beklenir ve kuruma sonrası hemen bitirici işlemler uygulamaya başlanır. Kaplama ilk uygulandığında yumuşaktır. Bu yüzden yüzey temizlenirken ve kurutulurken dikkat edilmelidir aksi takdirde kaplama çizilebilir ya da kalkabilir [24].

Kullanılan korozyon önleyici astarlar genel kullanım veya aerodinamik dış yüzeylerde kullanılmak için üretilmiş olup yangına ve havacılık hidrolik sıvısına dayanıklı epoksi içermektedir. Gövdenin dış yüzeyi ve dikey dengeleyici üretilen katkılı epoksi astar üstüne havacılıkta kullanılan hidrolik sıvısına dayanıklı dekoratif poliüretan ile boyanır ve böylece kurtçuk korozyonuna karşı dayanıklılık sağlanır [24].

Krom VI içeren kimyasal dönüşüm kaplamaları

Havacılık endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan dönüştürme kaplaması, Henkel den Alodine veya MacDermid ten Iridite ticari isimleri altında kromat dönüşüm kaplamasıdır (CCC) [25,26]. ASTM B117'ye göre nötr tuz püskürtme testi sırasında 1,400 saate kadar alüminyum alaşımlarında istikrarlı ve tutarlı korozyon koruması sağlar [27,28]. Oluşum, yapı ve korozyon koruyucu özellikler, Ohio Eyalet Üniversitesi'nden Dr. Gerald Frankel liderliğindeki disiplinler arası bir araştırma ekibi tarafından 1990'ların sonlarından 2000'lerin

başlarına kadar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [29,30]. CCC oluşumu birkaç ardışık adımı içerir: (i) doğal alüminyum oksit film tabakasının metal yüzeyi aktif hale getirmek için florür ile aşındırılması, (ii) kaplama banyosunda Cr (VI) 'nın aşağıdaki hızda Cr (III)' e indirgenmesi bir $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-/3-}$ medyatörü ve (iii) Cr (III) -O-Cr (VI) karışık oksidin polimerizasyonu ve kromatin omurgaya adsorpsiyonu. Elde edilen CCC, 3: 1 Cr (III): Cr (VI) molar oranına sahip bir Cr (VI) / Cr (III) karışık oksittir. Kaplama süresine bağlı olarak kaplama genellikle 0,1 ila 1 μm kalınlığındadır. CCC, kaplamadan çözünmüş O_2 ve iyonların çevreden taşınmasını engelleyerek, korozyonun başladığı ve klorür adsorbe ettiği anodik Al bölgeleri ve O_2 kimyasal soğurmaları için katodik intermetalik alanları bloke ederek ve kaplama filmi boyunca elektronların tünelleme oranını düşürerek alüminyum alaşımlarına aktif, kendi kendini iyileştiren korozyon koruması sağlar. Ayrıca, CCC tarafından sağlanan olağanüstü korozyon koruması, Frankel ve diğerleri tarafından yapay bir çizik hücresi kullanılarak incelenen "kendi kendini iyileştirme" özelliğine de atfedilir. Bu mekanizmada, kaplamada depolanan hareketli kromat çözelti içine sızar, yakındaki kaplanmamış, kusurlu bölgelere göç eder, çözülmeyen bir pasifleştirici Cr (III) hidroksit tabakası oluşturmak için indirgendiği aktif olarak aşınan bölgelerde adsorbe olur. CCC, askeri şartname MIL-DTL-5541F'yi karşılar. İster boyalı ister boyasız olsun, maksimum korozyon korumasını gösteren Sınıf 1A kaplamayı üretmek için onaylanmış bir malzemedir [28]. CCC ayrıca boya kaplama sistemlerinin alüminyum ve alaşımları üzerindeki yapışmasını iyileştirir [27].

Bununla birlikte, altı değerlikli krom insanlar için kanserojendir ve temel çevresel kirletici maddeyi temsil eder [31,32]. Kronik inhalasyonla akciğer kanserine, kromatlı tekstillerle veya kromatlı deri ayakkabılarla temas ederek dermatiti şiddetlendirir ve mide ve bağırsaklarda tahriş ve hatta ülserlere neden olur. Altı değerlikli krom, yapı ve yük bakımından kromat ve sülfatın benzerliğinden dolayı sülfat taşıma mekanizmaları ile hücrelere taşınır. Hücrelerin içindeki Cr (VI), C vitamini ve diğer indirgeyici maddeler tarafından Cr (V) 'ye indirgenir. Hasar, beş değerli kromun hücrelerdeki hidrojen peroksit tarafından yeniden oksitlenmesi sırasında üretilen hidroksil radikallerinden kaynaklanır [33].

Krom VI içermeyen kimyasal dönüşüm kaplamaları

Altı değerlikli kromun toksik ve kanserojen doğası nedeniyle, bunların kullanımı ve atık bertarafı ile ilgili giderek daha katı bir mevzuat oluşturulmuştur. Mesleki Güvenlik ve Sağlık

İdaresi (OSHA), havaya maruz kalma için $5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ 'lük izin verilen maruz kalma sınırını (PEL) düzenleyerek, 2006 yılında Cr (VI) bileşikleri için nihai standardını yayınladı [34]. Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü (NIOSH), havada maruz kalma için $0,2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ 'lük önerilen bir maruz kalma sınırı (REL) önermiştir [35]. Bu nedenle, altı değerlikli krom içermeyen, ancak alüminyum alaşımları için eşit derecede iyi korozyon koruması ve CCC'ler olarak astar / boya yapışması sergileyen alternatif ön işlem dönüşüm kaplamalarının geliştirilmesine büyük çabalar odaklanmıştır.

Bu amaçla, 1990'ların ortasında Sanchem Inc., bir alüminyum alaşım (AA1100) için permanganat ve silikat bazlı dönüşüm kaplamaları tasarladı. 1990'ların sonunda, Henkel Corp. iyi astar / boya yapışması ve elektriksel temas direnci sağlayan bir kobalt dönüşüm kaplaması geliştirdi, ancak tuz püskürtme korozyon testlerinde başarısız oldu. 2000'lerin başından beri, Dr. O'Keefe ve Rolla'daki Missouri Üniversitesi'nden araştırma grubu, bir seryum dönüşüm kaplamasının (CeCC) geliştirilmesi üzerinde çalışıyor ve bunun elektro birikimli versiyonu, birden çok alüminyum alaşımında ve boya yapışmasında iyi bir korozyon koruması vaat ediyor [19,36]. Kaplama, bir Ce (III) / Ce (VI) karışık oksit oluşturur ve kalınlığı, hazırlama işlemine (örneğin, yağ giderme sıcaklığı) bağlı olarak birkaç yüz nanometre aralığındadır. Tuz püskürtme testleri, CeCC'nin alüminyum alaşımlarına iyi bir korozyon koruması sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, farklı substrat alaşımları için işleme parametrelerini kontrol etmek çok önemlidir, bu da bu kaplamanın kullanımını azaltır. Ayrıca, birkaç araştırma grubu tarafından bir vanadat dönüşüm kaplaması (VCC) da önerildi [37,38]. CCC'ye benzer şekilde, VCC hidroliz, yoğunlaşma ve polimerizasyon yoluyla oluşur ve birkaç oksidasyon durumunda vanadyumdan oluşur. Kaplama, çukurlaşmaya karşı direnci artırır, oksijen azaltma reaksiyonlarını bastırır ve bir miktar aktif korozyon koruması sağlar. Bununla birlikte, vanadyumun memelilerde kansere neden olan bir ajan olmamasına rağmen bazı olumsuz sağlık etkileri yarattığı bilinmektedir. VCC'nin yaygın olarak kullanılmamasının ana nedeni budur.

CCC'nin ümit verici bir alternatifi, son zamanlarda geniş kabul gören üç değerlikli krom proses (TCP) kaplamadır. İlk olarak, numuneleri $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ ve Na_2SiF_6 veya NaF içeren sulu çözeltilere daldırarak alüminyum alaşımlarını kaplayan Agarwala ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir [39]. Daha sonra, Deniz Hava Sistemleri Komutanlığı (NAVIAR), doğası gereği farklı olan ve gelişmiş korozyon koruma ve yapışma özelliklerine sahip zirkonyum bazlı bir TCP kaplaması geliştirmiştir [40]. TCP şu anda piyasadaki önde gelen

kromat olmayan dönüşüm kaplamalarından biridir. Banyoları fluorozirkonat solüsyonlarına (H_2ZrF_6 veya K_2ZrF_6) benzerdir, ancak ilkinin çözünür Cr (III) tuzları içermesi (ağırlıkça $< \% 5$) ancak Cr (VI) içermemesi, TCP'yi CCC'den daha az toksik ve çevre dostu yapar [41]. TCP'nin alüminyum alaşımları için ortak bir ön işlem olarak artan kullanımı nedeniyle, alüminyum alaşımları üzerindeki oluşumu, yapısı ve korozyona karşı koruma özelliklerinin temel anlayışına büyük çabalar odaklanmıştır.

Birkaç başka florozirkonat kaplama da geliştirilmiş ve ticari olarak satılmaktadır. Örneğin, kaplama banyosunda florozirkonat ve florotitanattan oluşan Zr / Ti bazlı bir kaplama vardır. Henkel bunu 1980'lerin başında geliştirmiştir ve Alodine® 5200 veya 5700 tarafından bilinmektedir. Alodine® 5700, 5200'ün (konsantre) kullanıma hazır veya seyreltilmiş bir versiyonudur [42,43]. Kaplamalar daldırma, püskürtme ve silme, vb. İle uygulanabilir. Önceki çalışmalar, Alodine® 5200 kaplamalı AA2024'ün nötr tuz sisi testi (ASTM B 117) sırasında 48 saat içinde korozyona uğradığını göstermiştir [44]. Bununla birlikte, 5200 kaplamasının diğer kromat içermeyen astarlar (örneğin MIL-PRF-85582 N, MIL-PRF-53030, vb.) İle bağlandığında korozyon direnci ve yapışma açısından saygın bir performans sağladığına dikkat etmek ilginçtir. Bu, mükemmel yapışma özellikleri ile açıklanır. 5200 ve astarlar (yani MIL-PRF-53030) ve üst kaplamalar (yani MIL-C-53039) ile kaplanmış bazı AA2024 panelleri, korozyon direnci açısından CCC'lerin performansını bile aştı [45]. Bununla birlikte, kimyasal yapısı ve sadece 5200 kaplaması tarafından sağlanan herhangi bir korozyon koruması olup olmadığı hakkında çok az şey bilinmektedir.

Florozirkonat kaplama ailesinin bir diğer üyesi, Zr / Zn bazlı dönüşüm kaplamasıdır. Çalışmalar, Zn^{2+} 'nin asidik ve nötr pH'ta etkili bir çözünür inhibitör olduğunu göstermiştir [46]. Bu nedenle NAVAIR, florozirkonat kaplama banyosuna çinko sülfat ekleyerek inhibitör Zn^{2+} ile florozirkonat bariyer kaplamayı eşleştirdi. Şu anda NAVAIR'de geliştirme aşamasındadır. Bu nedenle, Zr / Zn bazlı dönüşüm kaplamasının temelinin anlaşılması için yapısının, stabilitesinin ve korozyon koruyucu özelliğinin karakterizasyonu gereklidir.

Anotlama

Alüminyumun korozyon ve aşınma dirençlerini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile oksit tabakası kalınlaştırılır. Bu film olduğundan birkaç kez daha kalınlaştırılabilir [47]. Bu işlem ismini kaplanacak Al parçanın elektrolitik bir hücrede anot

olarak davranmasından almaktadır. Bundan farklı olarak elektro kaplama işleminde ise parça katot haline getirilir. Anotlama her ne kadar alüminyum ile özdeşleşmişse de magnezyum, titanyum ve çinko için de benzeri işlemler vardır [24].

Alüminyumun anotlanması çok farklı elektrolitlerde, farklı çalışma şartlarında, ilave malzemelerin varlığında, çeşitli sıcaklık, voltaj ve akımlarda gerçekleştirilebilir. Anotlanan yüzeyin korozyona karşı dayanıklı olmasının yanı sıra atmosfere ve tuzlu suya karşı yüksek derecede dirençlidir. Anodik kaplama korozif elemanlara karşı bir bariyer görevi görerek altında bulunan metali korur. Optimum korozyon dayanımı sağlamak için anotlamayla oluşturulan amorf alüminyum oksit asitli sıcak suda, kaynayan deiyonize suda, sıcak dikromat çözeltide veya nikel asetat çözeltisinde işleme tabi tutulur [24].

Anotlama işleminde korozyona karşı dayanım kazandırılmasının yanı sıra aşınma dayancı artırılır, görünüm düzgünleştirilir, boyanın yapışma kabiliyeti arttırılır, adhezif bağlanma özellikleri ve yağlayıcı özellikleri geliştirilir. Özellikle havacılıkta kullanılan ince fosforik asit veya kromik asit anotlama ile bağ dayanımı arttırılır.

Anotlama işlemlerinde isimlendirme kullanılan elektrolite göre yapılır. Elektrolit olarak kromik asit kullanıldığında kromik anotlama, sülfürik asit kullanıldığında sülfürik anotlama veya sülfürik asit ile ilave malzemelerin kullanımında sert anotlama adıyla anılan üç temel anotlama işlemi vardır. Özel prosesler ile daha seyrek olarak kullanılan anotlama çeşitlerinden bazıları ise havacılık için fosforik asit olmak üzere borik asit, oksalit asit, tartarik asit" dir. Sert anotlama işlemiyle elde edilen kalın kaplama dışında çoğu proseste kalınlık 5-18 µm aralığındadır [24].

6.3. Alüminyum Yüzey Kaplama İşlem Basamakları (Proses Adımları)

Yüzey işlemler, ürünün estetik görünümünü iyileştirmek ve/veya korozyon ve aşınmaya karşı direncini arttırmak için yapılır. Birçok yüzey işlem prosesi öncesinde, yüzeyi hazırlamak amacı ile "yüzey ön işlemleri (yüzey hazırlama)" uygulanır. "Yüzey ön işlemleri" ile yüzeyinde dekoratif görünümü değiştirilebileceği gibi, esas yüzey işleme oluşturulacak tabakanın iyi tutunması için yüzeyin tutunma kabiliyeti geliştirilebilir [24].

6.3.1. Yüzey hazırlama

Mekanik ön işlemler

Mekanik işlemler arasında polisaj (parlatma), satinaj, çapak alma veya kumlama gibi işlemler sayılabilir. Çapak alma ve kumlama gibi işlemler daha ziyade küçük parçalar için uygulanır. Polisaj ve satinaj işlemleri ise genellikle profillere uygulanır. Satinaj işlemi sonucunda özellikle ekstrüzyon çizgilerini kamufle etme ve/veya kimyasal matlaştırmayı kolaylaştırmaya yönelik, kullanılan fırça tellerinin kalınlığına bağlı olarak, hafif çizgiler oluşturulur. Polisaj işlemi sonucunda parlak bir yüzey elde edilir[24].

Kimyasal ön işlemler

Kimyasal ön işlemler, istenen yüzey kalitesine göre seçilir. Sonuçta mat yüzey elde etmek için sodyum-hidroksit içeren eriyiklerde dağlama (kostikleme) yapılırken, parlak yüzey eldesi için de asit içeren eriyiklerle kimyasal daldırma veya elektrokimyasal parlatma metodları kullanılır. Parlatma için kullanılan eriyiklerde, fosforik, sülfürik, nitrik, kromik asitlerin tamamı veya birkaçı bulunabilir. Kimyasal ön işlemler, birkaç etaptan oluşur. Matlaştırmaya yönelik kostikleme veya parlatma işlemlerinden önce, yüzeye aşındırıcı tesirde bulunmayan bir temizleyici (yağ alma) işlemi uygulanır. Kostikleme veya parlatma işlemini ise, yüzeyde oluşacak reaksiyon kalıntılarını temizlemeye yönelik bir asitle temizleme işlemi takip eder[24].

Alüminyum alaşımları üzerine çeşitli tipte dönüştürme kaplamalarının uygulanmasından önce, metal yüzeyin kirlenici maddeleri gidererek temizlenmesi ve doğal oksit filmleri deoksidize ederek çıplak metali açığa çıkarmak önemlidir. Kapsamlı çalışmalar, bu yüzey ön işlemlerinin dönüşüm kaplamalarının korozyon koruma performansı için kritik olduğunu göstermiştir [24].

Yağ alma

Genellikle, yağ alma eriyikleri, su-esaslı eriyikler olup, karbonat, fosfat, ıslatıcı ajan ve bazen de bir kompleks yapıcı içeren bazik eriyiklerdir. Alternatif olarak, sülfürik veya fosforik asit ve bazı ilave kimyasallar içeren asidik bir eriyik de olabilir. Oda sıcaklığında çalışan, bazı

hidrokarbon eriticiler içeren organik esaslıyağ alıcılar, özellikle mekanik yöntemle parlatılmış yüzeylerdeki polisaj cilasını temizlemekte yetersiz kalırlar[24].

Yağlar ve kirleticiler fabrikasyon yağlayıcılarından gelir. Metal yüzeyde homojen bir dönüşüm kaplamasının montajını ve yapışmasını önleyebilirler. Düzgün olmayan bir kaplama, her ikisi de korozyonu artıran, yüksek katodik veya anodik aktiviteye sahip lokalize alanlara yol açabilir. Bu nedenle, alüminyum alaşımları kaplamadan önce daima temizlenir / yağı alınır. Temizleyici / yağ gidericiler alkali, nötr ve asidik olarak sınıflandırılır ve alaşım bileşimi, geçiş yapan oksit tabakası veya is varlığı ve diğer karmaşık kirleticiler maddelerin varlığına göre kullanılmak üzere seçilir [24].

Aşındırma

Yağların ve yağlayıcıların çoğu bir temizleme / gres giderme adımı ile çıkarılabilir. Solüsyonun alkalinitesine ve daldırma süresine bağlı olarak alaşım yüzeyinde olası aşındırma ile kalan gres kirlenmesini gidermek için bir alkali solüsyon işlemi kullanılabilir. Alkalın yağlayıcılar daha aktif alüminyum çıkarma eğilimindedir, ancak bakır gibi daha asal metalleri geride bırakır. Gelişmiş yüzey bakır konsantrasyonları, alüminyum için daha fazla korozyon hassasiyetine yol açabilir. Bu nedenle, bakır içeriğini seçici bir şekilde azaltmak, genellikle korozyon direncini iyileştirmek için ön işlem sürecinin bir hedefidir. Örneğin, alkali çözelti içinde çözünen metasilikat, alüminyum alaşımı yüzeyinde daha düşük bir bakır konsantrasyonuna yol açan yüzey aşınmasını önleyebilir. Çalışmalar, silikat tuzunun bazı dönüşüm kaplamalarının oluşumunu engellediğini göstermiştir, örn. TCP kaplaması. Ek olarak, hiçbir evrensel aşındırıcı, örneğin hem alüminyum hem de bakır alaşımlarını etkili bir şekilde temizleyemez. Bununla birlikte, bu ilk iki adım, temizleme ve dağlama, çoğu alüminyum alaşımı temizleme ön işlemi için evrensel görünmektedir[24,48].

Deoksidasyon / Çamur alma

Smut, yağlayıcı gibi bir metal işleme aşamasından veya çökelti metal oksit gibi aşındırma ön işleminden kalan kalıntıları tanımlayan genel bir terimdir. Deoksidasyon / desmutting, alttaki metal yüzeyi açığa çıkarmak için başta alüminyum alaşımları için oksit filmler olmak üzere herhangi bir kalıntının kimyasal olarak uzaklaştırılmasıdır. Alaşım yüzeyi, dönüştürme kaplamasının düzgün yapışması için dayanıklı bir arayüz oluşturmak üzere

yeniden yapılandırılmıştır. Oksit gidericiler, yüzey oksit tabakasını çözmek için hidroksit ve / veya amonyak kullanan alkalın olabilir. Bununla birlikte, asidik deoksidizer, metalleri ve oksitlerini daha fazla çözündürme gücünden dolayı daha yaygın olarak kullanılır. Sülfürik asit, nitrik asit ve hidroflorik asit dahil olmak üzere birkaç asit banyosu kullanılır. Sülfürik asit diğer iki asitten daha az agresiftir ve bu nedenle uygun deoksidasyon için daha yüksek bir çalışma sıcaklığı veya daha uzun işlem gerektirir. Nitrik asit, bu halo asitlerden daha az agresiftir ve genellikle aktif metaller, örneğin saf alüminyum veya işlenmiş alüminyum magnezyum için kullanılır. Hidroflorik asit, en güçlü deoksidizör / desmutterdir ve alkali aşındırma sırasında oluşan metasilikat birikintilerini çözmek için kullanılır. Bu banyolar, halojen konsantrasyonunun yüzey reaktivitesini ve deoksidasyon oranını belirlediği karışımlar olarak da kullanılabilir. Aşırı oksijen giderme, istenmeyen bir sonuç olan çukur korozyonuna neden olabilir. Aşırı deoksidasyonu önlemek için çözünme sürecini engellemek için katkı maddeleri eklenir. Deoksidizörlerin bu katkı maddeleriyle karışımları, agresifliklerini düzenlemeye yardımcı olur. Örneğin, çinkoat solüsyonu genellikle okside edici maddeye eklenir ve fazla yüzey erimesini veya aşınmayı geciktirir[24].

7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde Cr (III) içeren ve Cr içermeyen kimyasal dönüşüm kaplaması üzerine yapılmış birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Rémi ve diğerleri (2017) çalışmalarında yüzey ön işlemlerin (yağ alma ve aşındırma) saf alüminyum ve 2024-T351 alüminyum alaşımına üç krom içerikli kaplamanın (TCP) özelliklerine etkileri X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve yanma süresi ikincil iyon kütle spektrometresi (ToF-SIMS) teknikleriyle araştırılmıştır. XPS ve ToF-SIMS sonuçları, TCP kaplama homojenliğinin büyük ölçüde kullanılan ön işlem sürecine bağlı olduğunu kanıtlar. XPS sonuçlarından hesaplanan TCP kaplama faktörü, bir aşındırmadımı uygulandığında hem saf alüminyum hem de AA2024-T351 alaşım yüzeyinde önemli ölçüde daha düşüktür. Aşındırma ön işleminin ana etkilerinden biri, 2024 alaşımının yüzeyinde Al-Cu intermetalik parçacıkların kimyasal çözünmesiyle ilişkili olarak güçlü metalik bakır zenginleştirmesidir. Bununla birlikte, bakır zenginleştirmesinin TCP kaplamasının kalitesi için zararlı olmadığı burada kanıtlanmıştır [49].

Guo ve diğerleri (2012), çalışmalarında son zamanlarda kromat dönüşüm kaplamalarına (CCC) alternatif olarak kullanılan üç krom içerikli kaplamaları (TCP) karakterize etmiştir. TCP kaplamasının CCC'lere benzer şekilde kaplama yüzeyinde yüzlerce nm boyutunda parçacıklardan oluşan yoğun bir katman olduğu bulunmuştur. TCP kaplaması, dış katmanda zirkonyum-krom karışık oksit ve metal - kaplama arayüzünde ise alüminyum oksit veya oksiorür bulunan iki katmanlı bir yapıya sahiptir. TCP kalınlığı 40-120 nm aralığında olup, krom türü içermeyen zirkonyum bazlı kaplamadan önemli ölçüde daha kalındır. TCP kaplaması, koruyucu bir bariyer tabakası görevi görerek alüminyum alaşımlı yüzeylerdeki oksijen azaltma reaksiyonunu baskılayarak AA2024-T3'e korozyon koruması sağladığı görülmüştür [50].

Myriam ve diğerleri (2019) çalışmalarında, yeni bir alternatif üç değerlikli krom dönüştürme prosesinin 2024-T3 alüminyum alaşımının yorulma ömrü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kaplama işleminin neden olduğu yorgunluk ömründeki azalma, dönüştürme tabakası büyümesinden önceki deoksidasyon ön işlemi sırasında iri intermetalik parçacıkların çözülmesiyle ilişkili olduğu bulunmuştur [51].

Hashimoto ve diğerleri (2015), çalışmalarında alüminyum üzerinde üç değerlikli bir dönüşüm kaplamasının oluşumunu, analitik elektron mikroskobu, atomik kuvvet mikroskobu, iyon ışını analizi, kızdırma deşarjı optik emisyon spektroskopisi, Raman spektroskopisi ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi kullanılarak incelemiştir. Kaplamanın krom ve zirkonyum açısından zengin bir dış katman ve alüminyum açısından zengin bir iç katman içerdiği gösterilmiştir. Zirkonyum ve krom, ZrO_2 , ZrF_4 , $Cr(OH)_3$, $Cr_2(SO_4)_3$, CrF_3 ve CrO_3 veya CrO_4 ile uyumlu kimyasal hallerde bulunur. Ancak, havası giderilmiş çözelti içinde oluşan kaplamalarda ihmal edilebilir miktarlarda Cr (VI) türleri oluşmuştur. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi, iç katmanın, oda sıcaklığında 0,1 M sodyum sülfat çözeltisinde kısa süreli testler sırasında ana korozyon korumasını sağladığını ortaya çıkarmıştır [52].

Qi ve diğerleri (2016) çalışmalarında AA2024-T351 alaşımında üç değerlikli bir krom dönüşüm kaplamasının oluşumu, bileşimi ve korozyon koruması üzerindeki iki ön işlemin ve iki kaplama son işleminin etkileri arasında karşılaştırma yapmıştır. Ön işlemlerde alkali aşındırma ve ardından nitrik asit veya ticari bir oksit giderici içinde oksitlenmenin giderilmesi kullanılmıştır. Dönüşüm kaplamaları SurTec 650 chromitAL'de oluşturuldu ve 0.73-0.93 aralığında Cr: Zr atomik oranına sahip, alüminyum açısından zengin bir iç katman ve bir dış krom ve zirkonyum açısından zengin katman içeren iki katman ortaya çıkardı. XPS, kromla zenginleştirilmiş yüzeye yakın bir bölgede % 2 civarında Cr (VI) türlerini içerdiği çalışmalarında gösterdi. Potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi, bakır açısından zengin süngerler, muhtemelen alaşımı giderilmiş S fazı ve alaşım yüzeyinde diğer metaller arası parçacıkların daha az kalıntısı bırakan bir ön işlem için geliştirilmiş bir korozyon koruması ortaya çıkardığı görüldü [53].

Catherine ve diğerleri (2017) çalışmalarında AA7075-T6 üzerinde oluşturulan ticari (SurTec 650 chromitAL) üç değerlikli krom prosesi (TCP) dönüştürme kaplamasının farklı varyantlarının yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında rapor oluşturmuştur. Daldırma ve püskürtme ile oluşturulan kaplamaların karşılaştırılması yapılmıştır. TCP kaplamasının üç farklı varyantı incelenmiştir: 650 E, C ve V. ICP-OES ile üç kaplama banyosunun hepsinde benzer Cr konsantrasyonları ortaya çıkarılmış, ancak Zr, Zn, S (sülfat gibi) konsantrasyonlarında farklılıklar göstermiştir, bunun yanında Fe konsantrasyonunda da bu üçünden de farklılıklar gösterilmiştir. SEM ve EDXS analizi ile metaller arası parçacıkların üzerinde ve çevresinde bir miktar zenginleşme veya kalınlaşma ile tüm alaşım yüzeyi

üzerindeki kaplama formlarını (daldırma ve püskürtme) ortaya çıkarılmıştır. Kaplamalar genellikle 650 E de gözlemlenen en yüksek yoğunluklu yüzeyi süsleyen nodüler parçacıklardan (agregalar) oluşur. Sadece, daldırma ile uygulanan 650 C için çatlama ve delaminasyon görülmüştür. Dönüşüm kaplamaları (daldırma veya sprey) laboratuvar ortamında 7 günlük bir yaşlandırma süresi boyunca daha hidrofobik hale geldiği gözlemlenmiştir. 7. günde statik su temas açıları tüm kaplamalar için 60–90 ° 'dir. Ellipsometri verileri, 650 E'nin laboratuvar ortamında 7 günlük bir yaşlandırma süresinden sonra 95 nm'de üç kaplamanın en kalını olduğunu göstermiştir. Genel olarak, püskürtülerek kaplanmış (3 dak) film kalınlığı, daldırma kaplamalı (4 dak) film kalınlığından daha azdır. Son olarak, Raman spektroskopisi, ortak lokalize ve geçici olarak oluşmuş Cr(VI)-O türleri ile kaplamalarda Cr(III)-O türlerinin (örn., Cr(OH)₃) lokalize bölgelerinin varlığını doğrulamıştır. (örn., CrO₄²⁻ ve veya HCrO₄⁻) [54].

Jinhua ve diğerleri (2012) çalışmalarında, proses parametrelerinin ve kaplama çözeltilerinin bileşenlerinin tehlikeli altı değerlikli krom varlığı üzerindeki etkileri, üç değerlikli krom dönüşüm kaplaması ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuçlar, daha kısa daldırma süresinin, daha düşük banyo pH değerinin ve daha düşük çalışma ve kurutma sıcaklıklarının, altı değerlikli krom varlığını geciktirdiğini göstermiştir. Ek olarak, oksalik asit kaplama çözeltisi ile hazırlanan dönüşüm kaplamalarındaki altı değerlikli krom konsantrasyonu, formik asit ve asetik asit kaplama çözeltiler ile hazırlanan dönüşüm kaplamalarındakilerden çok daha yüksektir. Sonuçlar ayrıca dönüşüm kaplamalarında altı değerlikli krom konsantrasyonunun, özellikle oksalik asit dönüşüm kaplaması için kaplama çözeltisine iki değerlikli kobalt ve nitrat anyonunun eklenmesi nedeniyle arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, kaplama çözeltisine hidroksil bileşiği d-glukonik asidin eklenmesi, altı değerlikli krom konsantrasyonunu etkili bir şekilde azaltabilir. Bu çalışmanın bulguları, üç değerlikli krom dönüşüm kaplamasında altı değerlikli krom oluşumunun daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve üç değerlikli krom kaplama çözeltisinin ve üç değerlikli krom bağlayıcıların yönetimini kolaylaştırabildiği gözlemlenmiştir [55].

Wei-Kunve diğerlerinin (2010) çalışmasının temel amacı, alüminyum alaşımları üzerine üç değerlikli krom, Cr (III), dönüşüm kaplamaları geliştirmektir. Yapılar üzerindeki Cr (III) konsantrasyonu ve daldırma süresinin etkisi ve kaplamaların antikorozyon performansı araştırılmıştır. Kaplamaların korozyon davranışları, potansiyodinamik polarizasyon kullanılarak oda sıcaklığında 0,5 M H₂SO₄ sulu çözeltide değerlendirilmiştir. Kaplamaların

yapısı ve değerlik durumu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile incelenmiştir. Cr(III) iyonlarının dönüştürme banyosuna eklenmesi, kaplamaların yapılarını ve bileşimlerini önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Cr oksitli kaplamalar daha yoğun ve daha ince bir yapıya sahiptir. Ayrıca, Cr(III) kaplamaların korozyon direnci, daldırma periyodunda kaplamaların çözünmesinden dolayı artan daldırma süresiyle azalma eğilimi göstermiştir. XPS analizine göre, Cr(III) dönüşüm kaplamaları Cr_2O_3 , $\text{Cr}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, ZrO_2 , $\text{Zr}(\text{OH})_4$, AlF_3 ve ZrF_4 'ten oluştuğu gözlemlenmiştir, ancak kaplamalarda altı değerlikli krom bileşeni gözlemlenmemiştir. Sonuç, 0,01 M Cr(III) ile 5 dakika süreyle çözeltide hazırlanan kaplamaların, bu çalışmadaki tüm dönüşüm kaplamaları arasında en pürüzsüz ve en yoğun yapıya ve en iyi antikorozyon performansına sahip olduğunu göstermektedir [56].

Batanve diğerleri (2010) çalışmalarında, silan kaplamaları incelemiştir. Silan kaplamalar çeşitli amaçlarla, örneğin korozyona karşı koruyucu bir tabaka oluşturmak veya sonraki kaplama için bir astar görevi görmek için metal yüzeylere uygulanır. Çalışmalarında bis-1,2-(trietoksisilil) etan (BTSE), üç farklı teknikle Al % 99.99 substratları üzerinde kaplamaları biriktirmek için bir öncü olarak kullanılmıştır: daldırma kaplama (su bazlı çözelti), vakumlu plazma ve atmosferik plazma. Silan kaplamaların yapısını, bileşimini ve yüzey morfolojisini karakterize etmek için kızılötesi yansıtma absorpsiyon spektroskopisi (IRRAS), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve alan emisyon tabancası taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır. Bu araştırmanın amacı, BTSE molekülünün biriktirme tekniği ile nasıl değiştirildiği hakkında bilgi almak için hazırlanan filmlerin yüzey ve yığın özelliklerini üç farklı yöntemle karşılaştırmaktır. Sonuçlar, daha geleneksel ıslak daldırma kaplamanın yanı sıra filmlerin hem vakum hem de atmosferik plazma tarafından biriktirilebileceğini göstermektedir. Vakumlu plazma ile çökeltilecek katmanlar, çift kaplama ile elde edilen silan katmanlarıyla karşılaştırılabilir, hibrit organik-inorganik olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, atmosferik plazma işlemi Si-O bağlarında daha zengin inorganik filmlerin oluşumuna yol açar. XPS ve FTIR ölçümleri Si-O-Si bağlarının varlığını gösterirken, Si-O-Si, Si-O-C, Si-O ve Si-CH₃ absorpsiyon bantları IRRAS ölçümleriyle ortaya çıkarılmıştır [57].

Brusciottive diğerleri (2010) çalışmalarında, nano dağılmış CeO_2 parçacıklarının dahil edilmesiyle alüminyum üzerinde ince su bazlı silan ön işlemlerinin karakterizasyonu incelemiştir. Nano dağılmış CeO_2 parçacıklarının dahil edildiği ince silan filmleri,

alüminyum alt tabakalar üzerine daldırılmalı kaplama ile biriktirilmiştir. İncelenen silan molekülü, insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkiyi azaltmak için endüstrinin ihtiyacını karşılamak için su bazlı bir çözelti olarak kullanılan bis-1,2-(trioksisilil)etan'dır (BTSE). Nano oksitlerin silan üzerindeki etkisi ilk olarak çözelti içinde Si NMR aracılığıyla analiz edilmiştir, bu da BTSE'nin yaşlanması ve stabilitesinin silan matrisindeki CeO_2 nanopartiküllerinin varlığından etkilenmediğini göstermiştir. Kirlenmiş kaplamadaki CeO_2 nanopartikülleri ile BTSE arasındaki kimyasal etkileşimler XPS ile araştırılmış ve sonuçlar Ce ile Si arasında olası bir bağ oluşumuna işaret etmiştir. Film yapısını ve yüzey morfolojisini araştırmak için alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), alan emisyonu Auger elektron spektroskopisi (FE-AES) ve transmisyon elektron mikroskobu (FIB-TEM) ile birleştirilmiş odaklanmış iyon demeti kullanılmıştır. Nano oksitlerin dahil edilmesiyle ince tabakaların oluşumundaki en büyük zorluk, film homojenliğini etkileyen ve korozyon saldırısı için tercihli yollar yaratabilen parçacık aglomerasyonunun oluşumunu önlenmesi oldu gözlemlenmiştir. Bu sorunun üstesinden gelinmiş ve sonuçta ortaya çıkan filmler, silan matrisine iyi bir şekilde gömülü olan ve her zaman ince bir silan tabakası ile kaplanan nanopartiküller ile tek tip ve homojen olarak görünmüştür. Numuneler üzerinde, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri yapılmış ve sonuçlar, ince silan filmlerinin bariyer özelliklerinin CeO_2 nano-dispersiyonlu parçacıkların eklenmesiyle nasıl iyileştirildiğini göstermektedir [58].

Yuanve diğerleri (2016) çalışmalarında, silan filmleri ile ön işleme tabi tutulmuş Al alaşımı üzerindeki silikon-epoksi kaplamaların elektrokimyasal ve sutaşıma özellikleri NaCl çözeltisinde incelemiştir. Sonuçlar, silan film ve silikon-epoksi kaplama arayüzündeki su konsantrasyonunun sürekliliğini göstermektedir. Ön işlem olarak silan film, gelişmiş bariyer özellikleri ve mükemmel korozyon koruması sağlar. Silan film/silikon-epoksi sınırındaki su konsantrasyonu sıçraması dikkate alındığında, kaplamanın difüzyon katsayısı doğrulama modeli ile deneysel yöntemden elde edilene benzemektedir. Ek olarak, diğer üç kaplama sistemine göre, silikon-epoksi/silan film (pH 3,5)/Al-alaşımlı sistem için en iyi yapışma sağladığı gözlemlenmiştir [59].

Mradve diğerleri (2010) çalışmalarında, korozyon koruması için 3-glisidoksipropiltrimetoksisilanın (3-GPTMS), AA2024-T3 alüminyum alaşımı üzerine kaplamasını açıklamıştır. Sol-jel morfolojisinin hem katodik polarizasyon altında çökmeye hem de nitrat dahil edilmesine olan bağımlılığı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile

araştırılmıştır. Silanizasyon çözeltisine eklendiğinde, sodyum nitrat, silan yoğunlaşmasının reaksiyonunu teşvik etmiş ve film kompaktlığını artırdığı gözlemlenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonuçları (EIS), silan filminin NaNO_3 ile katkılanmasının, bariyer özelliğini ve koruyuculuğunu iyileştirdiğini göstermiştir. AA2024-T3 yüzeyine potansiyostatik yöntem kullanılarak uygulanan silan filmleri, geleneksel ‘daldırmalı kaplama’ yöntemiyle elde edilenlere göre belirgin şekilde daha yüksek korozyon direnci sergilemiştir [60].

Bu tez çalışmasının genel amacı havacılık endüstrisinde kullanılmak üzere alüminyum malzemelerin korozyon direncinin arttırmak için kanserojen olan Cr (VI) içeren kaplam yerine, Cr (VI) içermeyen yüzey kaplaması hazırlanması, performansının incelenmesi ve alternatif kromat içermeyen kaplamaların Cr (VI) içeren kaplamalar ile karşılaştırılmasıdır. Yapılan literatür araştırması sonucunda Cr (III) içeren dönüşüm kaplamaları (TCP) ve krom içermeyen silan bazlı kimyasal dönüşüm kaplamaları, Cr (VI) içeren kimyasal dönüşüm kaplamalarına alternatif olarak geliştirildiği için bu çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada havacılık endüstrisinde, elde edilen yeni kaplamalar ile sağlığa zararsız ve istenilen performansta Cr (VI) içeren kaplamalara alternatif olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır.

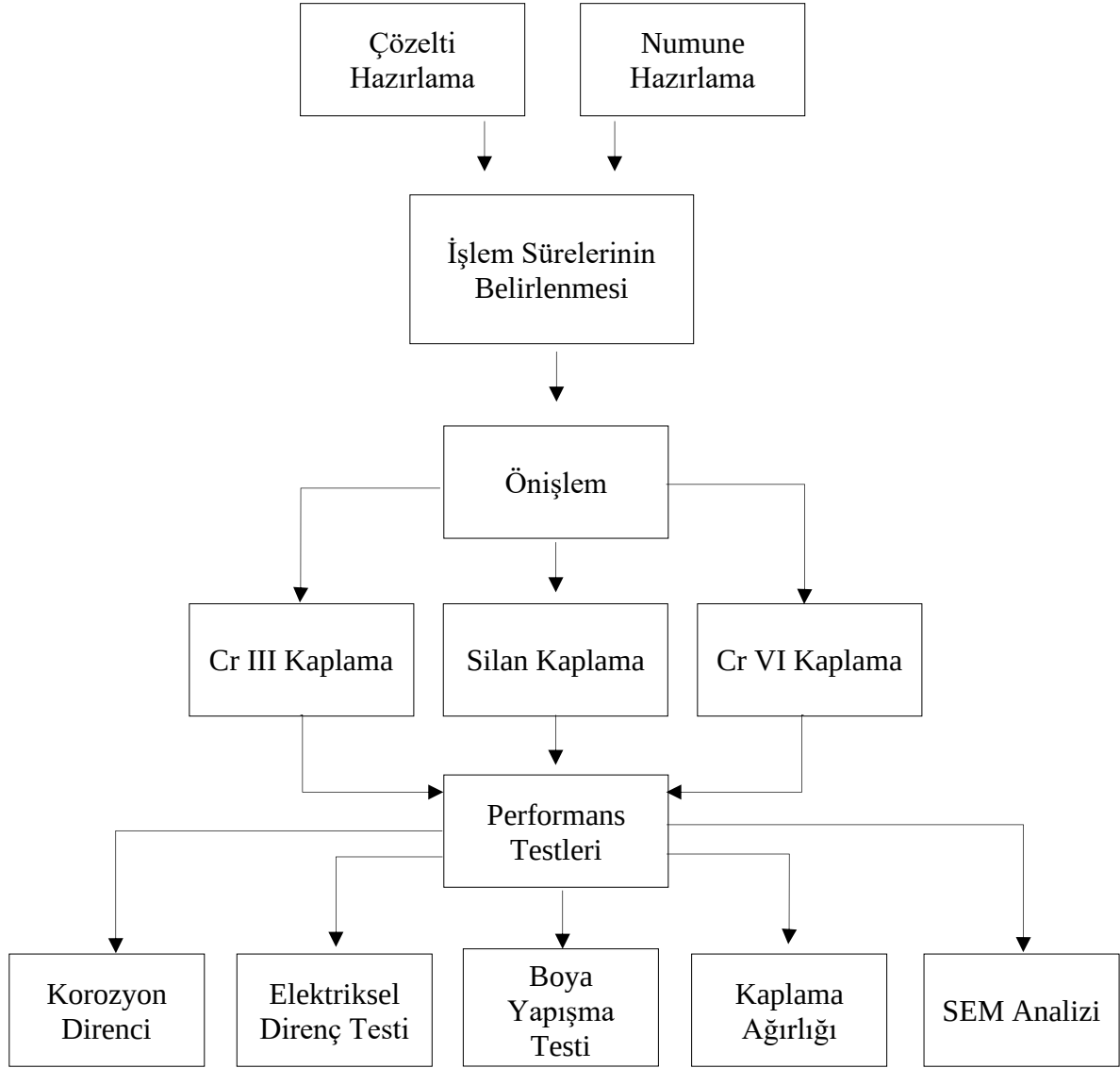
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Havacılık endüstrisinde kimyasal dönüşüm kaplamalarının kalifikasyonu için MIL-DTL-81706 standardı kullanılır ve bu standarda göre hava araçlarında kullanılabilmesi için kaplanmış 2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlarının korozyona karşı direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı değerlendirilerek standardın gerekliliklerini karşılaması gerekmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında kaplanmış alüminyum alaşımlarının hem korozyona karşı direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı hemde farklı tür kaplamaların yüzey karakterizasyonuna etkisi incelenmek istenmiştir. Bunun için bu çalışmada Cr (III) içeren dönüşüm kaplaması olarak Socomore ürünü olan Socosurf TCS ve PACS, krom içermeyen silan bazlı kimyasal dönüşüm kaplaması olarak Chemetall ürünü olan Ardrex 1768 ve Cr (VI) içeren kimyasal dönüşüm kaplaması olarak bir Henkel ürünü olan Alodine 1200-S kullanılmıştır. MIL-DTL-81706 standardında belirtilen testleri gerçekleştirmek ve en uygun kaplanmış yüzey oluşturmak amacıyla ön temizleme, yüzey hazırlama ve kaplama proses süreleri belirlenerek standarta belirtilen adet ve ölçülerdeki test panellerinin kaplaması yapılmıştır.

Kaplamaları yapılan panellerin korozyon direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı gerekliliklerini incelemek amacıyla tuz püskürtme testi, kaplama ağırlık ölçüm testleri, elektriksel direnç ölçümleri ve boya yapışma testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı tür yüzey kaplama kimyasalı kullanılarak kaplanan panellerin yüzey karakterizasyonun incelenmesi ve tuz püskürtme testine maruz kalan ve kalmayan panellerin karşılaştırılması amacıyla elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, alüminyum ve alaşımlarına ön yüzey işlemleri uygulandıktan sonra, krom III kimyasal dönüşüm kaplaması (TCP), krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması (CCC) ve silan kaplama 3 farklı alüminyum alaşımı üzerine uygulanarak, korozyon direnci, kaplama kalınlığı, boya yapışma performansı elektriksel iletkenlik performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak kurgulanan deney şeması Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Deneysel akış şeması

8.1. Çözelti Hazırlama

8.1.1. Alkali temizleme

Bu işlem, metal yüzeylerden organik ve inorganik kirleri çıkarmak için Çizelge 8.1'e göre yapılmıştır. Alkali temizleme yoluyla temizlenen kirler arasında yağ, mumsu katılar, metalik partiküller, toz, karbon partikülleri ve silika vb. bulunur. Temizleme sorunlarına ek olarak önemli bir endişe de kirin yaşıdır. Metal yüzeyde uzun süre yaşlanmasına izin verilen kirlerin çıkarılması giderek zorlaşır. İyi temizlenmiş parçalar elde etmek için sürekli işlem yapılmalıdır.

Alkali temizleme ve durulamadan sonra büyütmeden görsel olarak incelendiğinde, parçalarda kalıntı, çukurlaşma, dağlama, kuruma, leke ve mum kalem izleri, işaretleme mürekkepleri, baskı mürekkebi veya diğer kirletici maddeler bulunmamalı ve durulama sonrası su kırılmayan bir yüzey göstermelidir.

Çizelge 8.1. Alkali temizleme banyosu içeriği ve çalışma şartları

Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı
Bonderite C-AK 4215 NC-LT Aero	40-60 g/L	50-60 °C

Bonderite C-AK 4215 NC-LT Aero %40-60 arasında sodyum tetraborat pentahidrat, %5-10 arasında sodyum nitrat, %1-3 arası disodyum hekzaflorosilikat, %1-3 arası 2-(2-Butoksietoksi) etanol ve %1-3 benzotiazol-2-tiol içerir. Sodyum tetraborat pentahidrat yüzeydeki yağ ve diğer kirlilikleri 55 °C çalışma sıcaklığında kolayca çözerek yüzeyden arındırır.

8.1.2. Asitle temizleme (Deoksidasyon)

Asitle temizleme banyosu alüminyum parçaların yüzeylerindeki oksiti, pası, isi ve pulları çıkarmak için kullanılır. Bu banyonun aşındırma özelliği olduğu için kaplama banyosundan hemen önce kullanılır. Bu çalışmada kullanılan banyo özellikleri Çizelge 8.2’de verilmiştir.

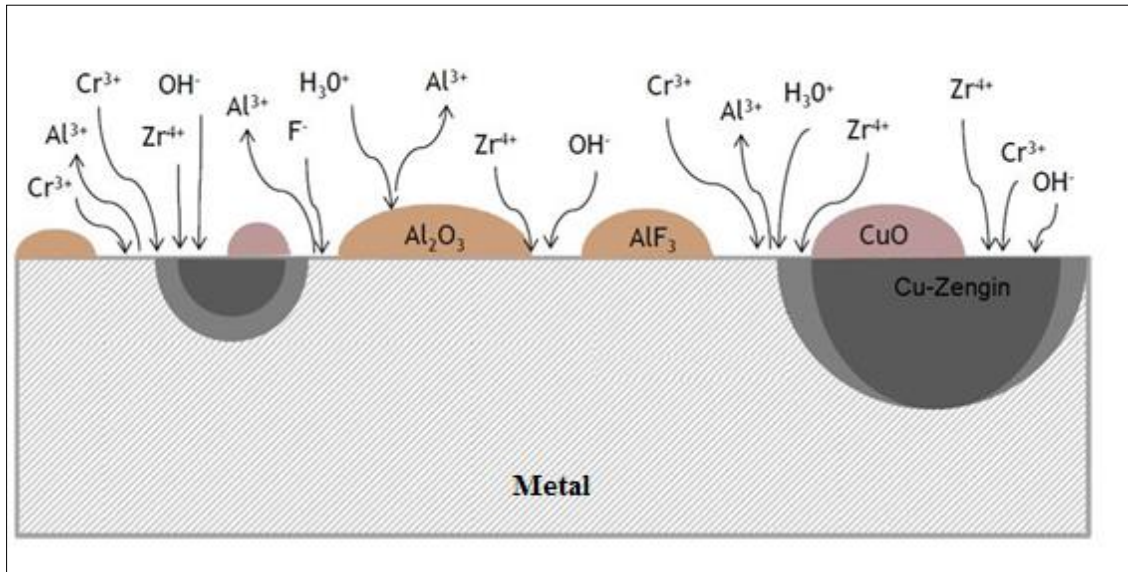
Çizelge 8.2. Asitle temizleme banyosu içeriği ve çalışma şartları

Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı	Aşındırma Oranı
CrO ₃	22-26 g/L	Oda Sıcaklığı	0,33-0,40 µ/dakika/yüzey 2024 T3 için HF ilavesi
HF			
HNO ₃	75-105 g/L		

8.1.3. Kimyasal dönüşüm kaplamaları

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması

Tipik olarak heksaflorozirkonat, krom sülfat ve pH ayarlayıcılar içeren krom III kimyasal dönüşüm kaplaması (TCP) banyosu, iyi korozyon özellikleri sağlayan bir kaplamanın birikmesine izin verir. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması dönüşüm banyosu ve pasivasyon banyosu olmak üzere iki farklı banyodan oluşmaktadır. TCP tabakasının yapısı dış kısımda zirkonyum ve krom oksitlerden ve iç kısımda alüminyum oksit ve florürden oluşur. İçyapı asıl korozyon korumasını sağlayan bölgedir. Biriktirme mekanizması, krom ve zirkonyum türlerinin birikmesine yol açan kombine alüminyum oksidasyonu ve proton veya dioksijen indirgemesiyle indüklenen alüminyum alaşımının yüzeyindeki yerel pH artışına dayanır [52]. Bu çalışmada kullanılan banyo özellikleri Çizelge 8.3 ve 8.4’de verilmiştir. Yapışma mekanizması ise Şekil 8.2’ de verilmiştir.



Şekil 8.2. Krom III içeren kaplamanın metale yapışma mekanizması

Çizelge 8.3. Dönüşüm banyosu içeriği ve çalışma şartları

Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı	pH
Socosurf TCS	% 36 (v/v)	35 - 45 ⁰ C	3,8 – 4,0

Socosurf TCS alüminyum oksit ve florürden oluşan ve asıl korozyon koruması sağlayan dönüşüm banyosudur.

Çizelge 8.4. Pasivasyon banyosu içeriği ve çalışma şartları

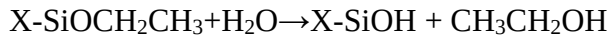
Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı	pH
Socosurf PACS	% 10(v/v)	20 - 30 ⁰ C	4,2 – 5,3
H ₂ O ₂	% 5 (v/v)		

Socosurf PACS zirkonyum ve krom oksitten oluşan, metal yüzeyinde korozyon koruması sağlayan alüminyum oksit ve florür yapıyı koruyan pasivasyon banyosudur.

Silan kaplaması

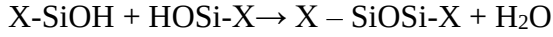
Silan film uygulamasından oluşan silanizasyon işlemi, son zamanlarda metalik malzemelerin korozyonuna karşı çevre açısından umut verici bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Silanlar, alt tabakaya güçlü bir yapışma sağlar ve Al alaşımları üzerinde, bazı durumlarda altı değerlikli krom içeren dönüşüm ön işlemiyle karşılaştırılabilir, olağanüstü korozyon koruma performansı sergiler.

Silan filmleri çoğunlukla metoksi veya etoksi gruplarını hidrolize etmek ve fonksiyonel silanol grupları oluşturmak için silan moleküllerine su eklenmesini gerektiren daldırma veya rulo kaplama yoluyla çözeltiden biriktirilir, yani:

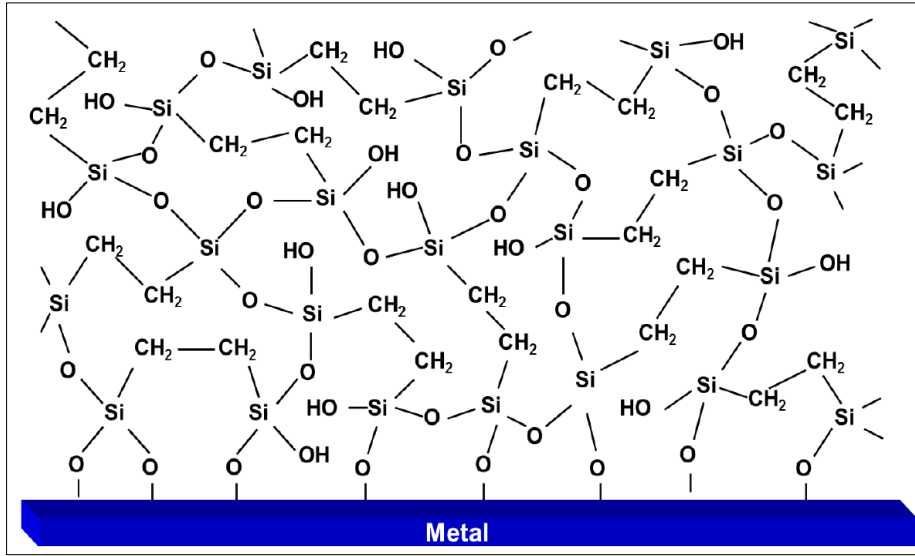


Burada X, klor, amin, epoksi veya merkapt vb. gibi organofonksiyonel bir grubu temsil eder. Organofonksiyonel silanlar, substratlar üzerindeki aktif bölgelerle kimyasal bağlar oluşturabilir (örneğin, güçlü Al O Si kovalent metallosiloksan bağlarının oluşumu).

Silanların metalik yüzeylerle etkileşiminin önemli bir yönü, substratın doğası ve ön işlemidir. Metal yüzeyinde hidroksil gruplarının oluşması için alkali bir ön işlem gereklidir. Silanol gruplarıyla birlikte, metal/film ara yüzeyinde kovalent bir Si-O-metal bağının oluşumu için gereklidirler [9,10]. Ek olarak, silan filmin ısıtılması işlemi çapraz bağlanmayı (silanol gruplarının yoğunlaşması) artırarak bariyer özelliklerini [10] iyileştirir, yani:



Bu çapraz bağlı film daha sonra, agresif türlerin nüfuz edebileceği yolların sayısını azaltarak metalik substrat ile agresif ortam arasında fiziksel bir bariyer görevi görecektir. Bu nedenle, filmin bariyer özellikleri ve dolayısıyla alt tabakanın korozyona karşı koruma özellikleri iyileştirilir [57]. Bu çalışmada kullanılan banyo özellikleri Çizelge 8.5 'de verilmiştir. Yapışma mekanizması ise Şekil 8.3' de verilmiştir.



Şekil 8.3. Silan kaplamanın metale yapışma mekanizması

Çizelge 8.5. Silan kaplama banyosu içeriği ve çalışma şartları

Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı	pH
Ardrox 1768	% 30 (v/v)	20 - 30 °C	4.2 – 5.2

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması

Bir diğer adıyla kromat dönüşüm kaplamaları, bir metalin sulu bir kromik asit çözeltisi, sodyum veya potasyum kromat gibi krom tuzları veya dikromat, hidroflorik asit veya hidroflorik asit tuzları, fosforik asit veya diğer mineral asitler içine daldırıldığında veya püskürtüldüğünde meydana gelen kimyasal saldırının bir sonucu olarak metal yüzeylerde oluşur. Kimyasal saldırı, bazı yüzey metallerinin çözünmesini ve kompleks krom bileşiklerini içeren koruyucu bir filmin oluşumunu kolaylaştırır[25]. Bu çalışmada kullanılan banyo özellikleri Çizelge 8.6 'da verilmiştir.

Çizelge 8.6. Krom VI içeren kaplama banyosu içeriği ve çalışma şartları

Tank Kimyasalı	Konsantrasyon	Çalışma Sıcaklığı	pH
Bonderite M-CR 1200S	7.5 – 11 g/L	16 - 37 °C	1.3 – 1.8

8.2. Numune Hazırlama

8.2.1. Test kuponu hazırlama

MIL-DTL-81706B satdardına göre her bir yüzey kaplama prosesinin testlerinde kullanılmak üzere Çizelge 8.7. de belirtilen ölçülerdeki ve alaşımlardaki test kuponları hazırlanmıştır [61].

Sınıf 1A: Korozyona karşı maksimum koruma istendiği yerlerde,

Sınıf 3: Düşük elektrik direncinin gerekli olduğu yerlerde korozyona karşı koruma için kullanılır.

Çizelge 8.7. Test matrisi

Test Adı	Sınıf	Alaşım	Panel Adedi	Panel Boyutları (mm)
Korozyon Direnci Testi	1A	2024-T3 Kladsiz	5	250x75x0,8
	3	6061-T6	5	
	1A	7075-T6	5	
Elektriksel Temas Direnci testi, Tuz püskürtme öncesi ve sonrası	3	6061-T6	5	
Boya Yapışma Testi, Başlangıçta	1A	2024-T3 Kladsiz	3	
	3	6061-T6	3	
	1A	7075-T6	3	
Boya Yapışma Testi, DI Suda bekletildikten sonra	1A	2024-T3 Kladsiz	3	
	3	6061-T6	3	
	1A	7075-T6	3	

Çizelge 8.7. (devam) Test matrisi

Test Adı	Sınıf	Alaşım	Panel Adedi	Panel Boyutları (mm)
Kaplama Ağırlığı	1A	2024-T3 Kladsiz	3	
	1A	7075-T6	3	
SEM	1A	2024-T3 Kladsiz	3	

8.2.2. Test kuponu kaplama



Resim 8.1. Kaplama proses hattı

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları

Yapılan literatür araştırması sonucunda belirlenen kimyasalların üreticilerinin önerdiği operasyon şartlarını değerlendirildiğinde her üç tip kimyasal ile kaplama için Çizelge 8.8, Çizelge 8.9 ve Çizelge 8.10’da belirtilen banyo sırlaması ve operasyon şartları belirlenmiş ve her bir alaşımlı test paneli bu sırlamalar takip edilerek kaplanmıştır.

Çizelge 8.8. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları

Operasyon No	Operasyon Adı	Durma Süresi (dk)	Banyo Sıcaklığı (°C)	Banyo İçeriği
1	Solventle Yağ Alma	-	-	MEK
2	Alkali Temizleme	15	50 - 60	Bonderite C-AK 4215 NC-LT Aero
3	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
4	Su Kırılım Testi	0,5	-	
5	Deoksidasyon	14	Oda Sıcaklığı	CrO ₃ , HF, HNO ₃

Çizelge 8.8. (devam) Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları

Operasyon No	Operasyon Adı	Durma Süresi (dk)	Banyo Sıcaklığı (°C)	Banyo İçeriği
6	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
7	Dönüşüm Banyosu	10	35 - 45	Socosurf Tcs
8	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
9	Pasivasyon Banyosu	5	20 - 30	Socosurf Pacs
10	Durulama	2	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
11	Kurutma	15	50 - 60	

Silan kaplaması işlem basamakları

Çizelge 8.9. Silankaplaması işlem basamakları

Operasyon No	Operasyon Adı	Durma Süresi (dk)	Banyo Sıcaklığı (°C)	Banyo İçeriği
1	Solventle Yağ Alma	-	-	MEK
2	Alkali Temizleme	15	50 - 60	Bonderite C-AK 4215 NC-LT Aero
3	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
4	Su Kırılım Testi	0,5	-	
5	Deoksidasyon	14	Oda Sıcaklığı	CrO ₃ , HF, HNO ₃
6	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
7	Dönüşüm Banyosu	1,5	20 - 30	Ardrox 1768
8	Durulama	2	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
9	Kurutma	15	50 - 60	

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları

Çizelge 8.10. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması işlem basamakları

Operasyon No	Operasyon Adı	Durma Süresi (dk)	Banyo Sıcaklığı (°C)	Banyo İçeriği
1	Solventle Yağ Alma	-	-	MEK
2	Alkali Temizleme	15	50 - 60	Bonderite C-AK 4215 NC-LT Aero
3	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
4	Su Kırılım Testi	0,5	-	
5	Deoksidasyon	14	Oda Sıcaklığı	CrO ₃ , HF, HNO ₃
6	Durulama	4	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
7	Dönüşüm Banyosu	1,5	16 - 37	Bonderite M-CR 1200S
8	Durulama	2	Oda Sıcaklığı	Deiyonize Su
9	Kurutma	15	50 - 60	

8.3. Performans Testleri

8.3.1. Korozyon direnci testi

Tuz püskürtme testi, malzemelerin korozyona karşı dirençlerini belirlemek için yapılan bir testtir. Tuz püskürtme deneyleri, belirli metalikler, anodik oksitler ve kaplamalar içindeki porlar ve diğer hatalar gibi süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılır. Nötral tuz püskürtme testleri şu malzemelere uygulanır:

- Metaller ve alaşımları
- Belirli metalik kaplamalar (anodik ve katodik)
- Belirli dönüşüm kaplamaları
- Belirli anodik oksit kaplamalar
- Metalik malzemeler üzerindeki organik kaplamalar

Bu çalışmada ASTM-B117 standardında verilen yönteme uygun şekilde numuneler 35°C’de 1024 saat süre ile nötral tuz püskürtme testine tabii tutulmuşlardır. Çizelge 8.7. da belirtilen ölçülerdeki alaşımların kaplamaları yapıldıktan sonra 6° eğimli şekilde kabine yerleştirilerek saf suyun içinde çözünmüş olarak bulunan %5’lik NaCl tuz çözeltisinin kaplamalı malzemelerin yüzeylerine sürekli püskürtülerek, metallerin korozyona uğraması ve kaplama malzemelerinin yaşlanması sağlanmaktadır. Resim 8.2 ‘de belirtilen tuz püskürtme kabinine test panelleri yerleştirilmiştir. 4 er gün arayla paneller kabinden alınıp saf su ile temizlenerek kontrol edilmiştir. MIL-DTL-81706 standardının gerekliliklerine göre 168 saat sonunda paneller çıplak gözle bakıldığında tuz püskürtme testine maruz kalmayan kontrol panelleriyle karşılaştırıldığında hiçbir korozyon kanıtı göstermemelidir. Renk farklılaşması görülen numunenin yüzey kesiti elektron mikroskopunda incelenmiştir ve diğer numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [61].



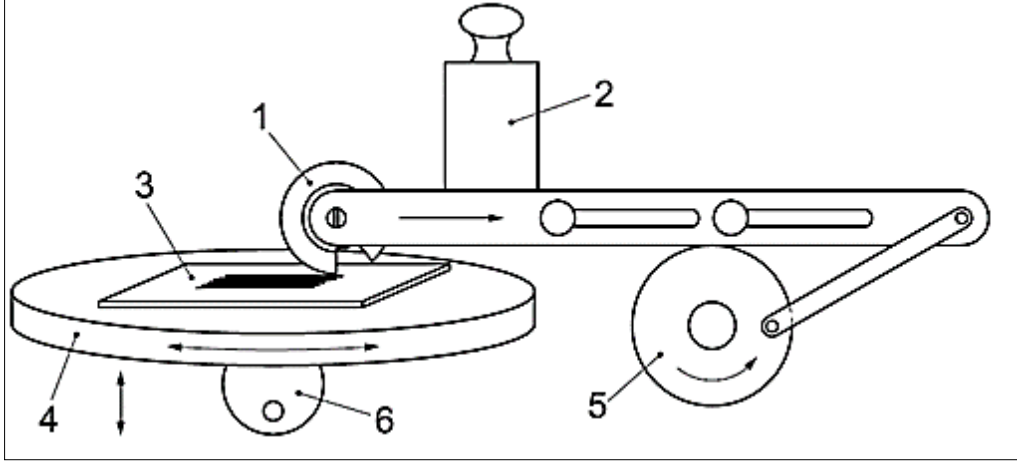
Resim 8.2. Tuz püskürtme testi kabini

8.3.2. Boya yapışma testi

Boya yapışma testi, kaplamaya dik açılı olarak bir kafes deseni kesildiğinde, alt tabakaya nüfuz ederek boya kaplamalarının alt tabakalarından ayrılma direncini değerlendirmek için yapılan bir test metodudur. Bu deneysel test prosedürü ile belirlenen özellik, diğer faktörlerin yanı sıra, kaplamanın ya önceki kaplamaya ya da alt tabakaya yapışmasına bağlıdır.

Bu çalışmada ISO 2409 standardında verilen yöntem uygun şekilde Çizelge 8.7’de belirtilen ölçülerdeki alaşımların kaplamaları yapıldıktan 24 saat sonra MIL-PRF-23377 ye uygun uçucu organik bileşik (VOC) uyumlu epoksi-poliamid astar, 15 ila 25 μ kuru film kalınlığında bir kat uygulanmıştır. Uygulama yapıldıktan sonra 7 gün boyunca kurumaya bırakılmıştır. 7 günün sonunda 3 numuneye ISO 2409 standardında belirtildiği gibi 1 mm aralıklar ile kaplamaya dik açılı olarak bir kafes deseni kesilip 1” genişliğinde 3M 250 nolu bant (ortalama yapışma 43 N/cm) kesilen yüzeye tüm yüzeyi temas edecek şekilde yapıştırılmıştır. Şekil 8.4 ‘de belirtilen kesme ekipmanı ile kafes deseni

çizilmiştir. Yapıştırılan bu bant şekil 8.5 ‘de belirtildiği gibi 60° lik açı ile hızlıca kaldırılarak çizelge 2.2 de belitilen sınıflandırmaya göre yüzey değerlendirilmiştir [61,62].



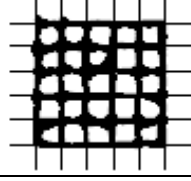
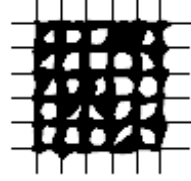
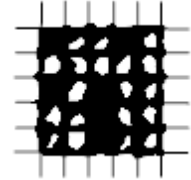
Şekil 8.4. Kesme ekipmanı; 1) Bıçak, 2) Ağırlık, 3) Test paneli, 4) Test paneli döndürme tablası, 5) Motor, 6) Test paneli döndürme tablası tutamacı

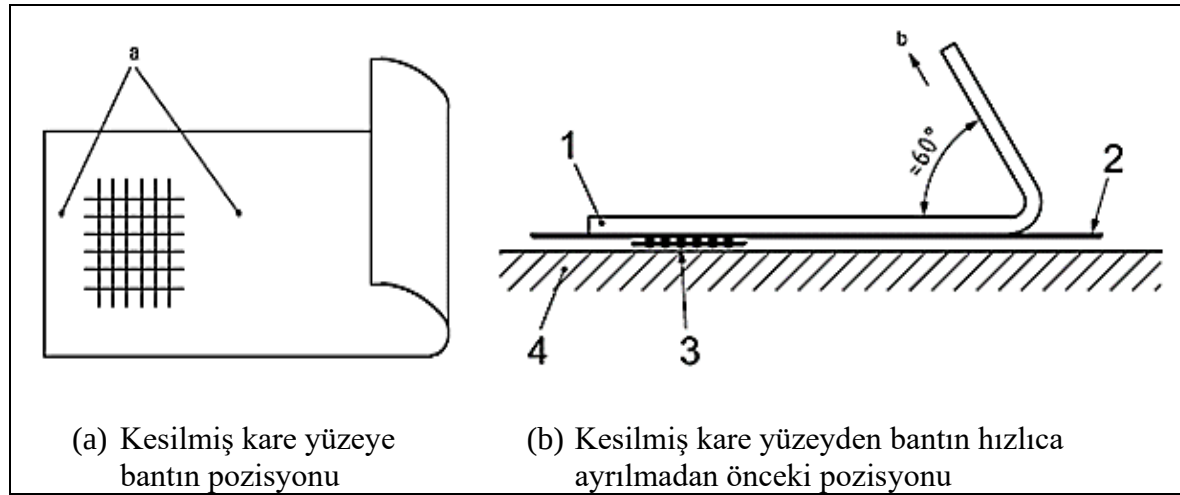
Diğer 3 numune ise 7 günün sonunda saf suyun içine daldırılarak 14 gün boyunca 23 ± 2 °C de bekletilmiştir. 14 günün sonunda çıkarılan numuneler kurulandıktan sonra yarım saat içerisinde yine 1 mm aralıklar ile kaplamaya dik açılı olarak bir kafes deseni kesilip 1” genişliğinde 3M 250 nolu bant (ortalama yapışma 43N/cm) kesilen yüzeye tüm yüzeyi temas edecek şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırılan bu bant 60° lik açı ile hızlıca kaldırılarak Çizelge 8.11 de belirtilen sınıflandırmaya göre yüzey değerlendirilmiştir [61,62].

Çizelge 8.11. Boya yapışma testi sonrası panel değerlendirme çizelgesi

Sınıf	Açıklama	Pullanmanın meydana geldiği çapraz kesim alanının yüzeyinin görünümü
0	Kesiklerin kenarları tamamen pürüzsüz; kafesin karelerinden hiçbiri ayrılmamıştır.	
1	Kesiklerin kesişme noktalarında kaplamanın küçük pullarının ayrılması. % 5'ten fazla olmayan bir çapraz kesim alanı etkilenir.	

Çizelge 8.11. (devam) Boya yapışma testi sonrası panel değerlendirme çizelgesi

Sınıf	Açıklama	Pullanmanın meydana geldiği çapraz kesim alanının yüzeyinin görünümü
2	Kaplama, kenarlar boyunca ve/veya kesiklerin kesişme noktalarında pul pul dökülmüştür. % 5'ten büyük, ancak % 15'ten büyük olmayan bir çapraz kesim alanı etkilenir.	
3	Kaplama, büyük şeritler halinde kısmen veya tamamen kesiklerin kenarları boyunca dökülmüştür ve/veya karelerin farklı kısımlarında kısmen veya tamamen dökülmüştür. %15'ten büyük, ancak %35'ten büyük olmayan bir çapraz kesim alanı etkilenir.	
4	Kaplama, büyük şeritler halinde kesiklerin kenarları boyunca pul pul dökülmüş ve/veya bazı kareler kısmen veya tamamen ayrılmış. %35'ten büyük, ancak %65'ten büyük olmayan bir çapraz kesim alanı etkilenir.	
5	4. Sınıflandırma ile bile sınıflandırılmayan pulların dökülmesi.	-

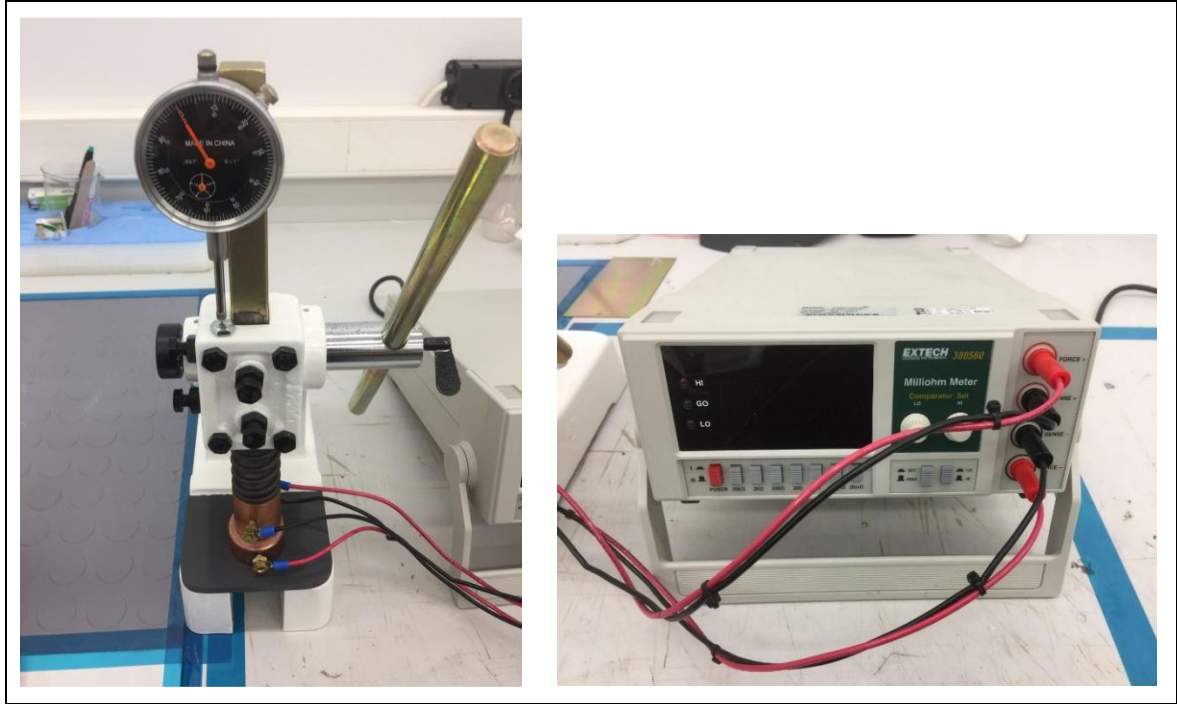


Şekil 8.5. Bant testi yapıştırma ve çekme işlemi; 1)Bant, 2)Kaplama yüzeyi, 3)Kesik yüzey, 4)Metal, a) Yapıştırma yönü, b) Bantı ayırma yönü

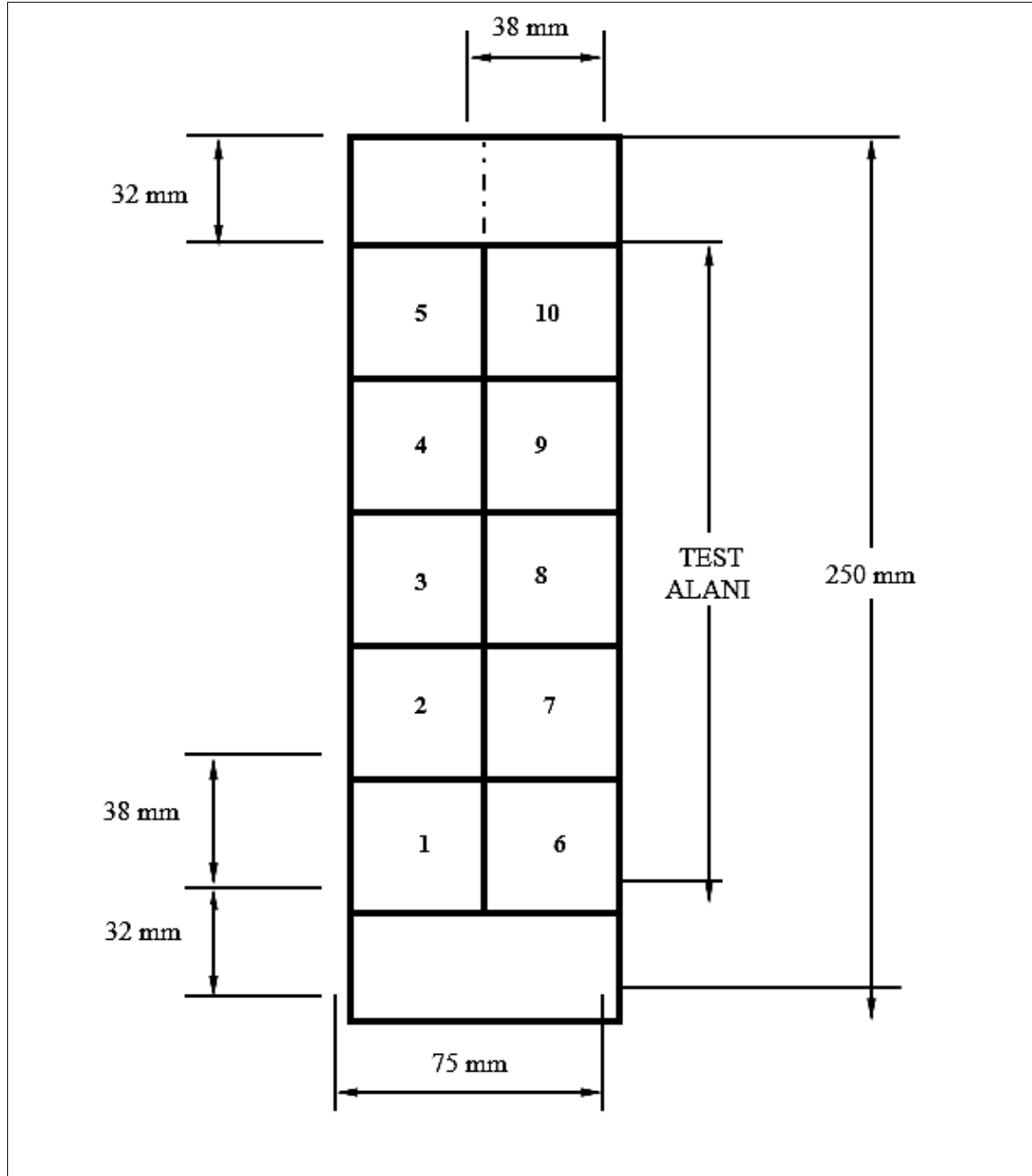
8.3.3. Elektriksel temas direnci testi

Elektriksel temas direnç testi, kaplamanın elektriksel olarak iletkenliğini değerlendirmek için yapılan bir test metodudur.

Bu çalışmada MIL-DTL-81706 standardında verilen yönteme uygun şekilde  izelge 8.7. da belirtilen ölçülerdeki alaşımların kaplamaları yapıldıktan sonra elektriksel temas direnç testi geçekleştirilmiştir. Kaplamaları yapılan paneller 24 saat boyunca oda şartlarında kurumaya bırakıldıktan sonra ölçüm yapılmıştır. Test panellerinin temas elektrik dirençleri Resim 8.3 de belirtilen ekipman ile in  kare başına 200 pound (psi) uygulanan bir elektrot basıncı ile ölçülmüştür. şekil 8.6'da gösterilen alanlardan her panelde on ölçüm yapılmıştır. MIL-DTL-81706 standardına göre paneller test edildiğinde 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapılanlar $5.000 \mu\Omega$ 'dan ve 24 saat sonrasında 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılanlar $10.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olmayacaktır. Tüm okumaların ortalamasının belirtilen maksimum direnci aşmaması koşuluyla, belirtilen maksimum değerleri aşan, %20 den fazla olmayan bireysel okumalar kabul edilebilir [61].



Resim 8.3. Elektriksel direnç testi ölçüm ekipmanı



Şekil 8.6. Panellerin elektrik direnci ölçüm alanları

8.3.4. Kaplama ağırlığı

Kaplama ağırlığı, kimyasal dönüşüm kaplamalarında daldırma işlemi ile yapılan yüzey kaplamalarının tutunmasını değerlendirmek amacıyla yapılan bir performans testidir.

Bu çalışmada MIL-DTL-81706 standardında verilen yöntem uygun şekilde Çizelge 8.7. da belirtilen adet ve ölçülerdeki alaşımların kaplamaları yapıldıktan sonra kaplamalı panel

ağırlığı tartımı alınıp panellerden kaplama söküldükten sonra son tartım alınarak kaplama ağırlıkları ölçüldü. Dönüşüm kaplaması uygulandıktan sonra 3 saat içinde 0,1 miligram hassasiyette terazi ile paneller tartıldı. Tartıldıktan hemen sonra, numuneler, oda sıcaklığında tutulan, hacimce eşit miktarda nitrik asit (% 70 HNO₃) ve deiyonize sudan oluşan taze yapılmış nitrik asit çözeltisine 60 saniye daldırıldı. Numune temiz bir pamuklu çubukla fırçalanarak kaplamanın çıkarılması kolaylaştırıldı. Dönüştürme kaplamasının çıkarılmasından sonra, numune deiyonize suda iyice durulandı, temiz, filtrelenmiş yağsız hava ile kurutuldu ve yeniden tartıldı. Metrekare başına miligram cinsinden kimyasal dönüşüm filminin ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplandı;

$$\text{Kaplama Ağırlığı} = W_1 - W_2 (\text{mg/m}^2)$$

W_1 = İlk Tartım (mg)

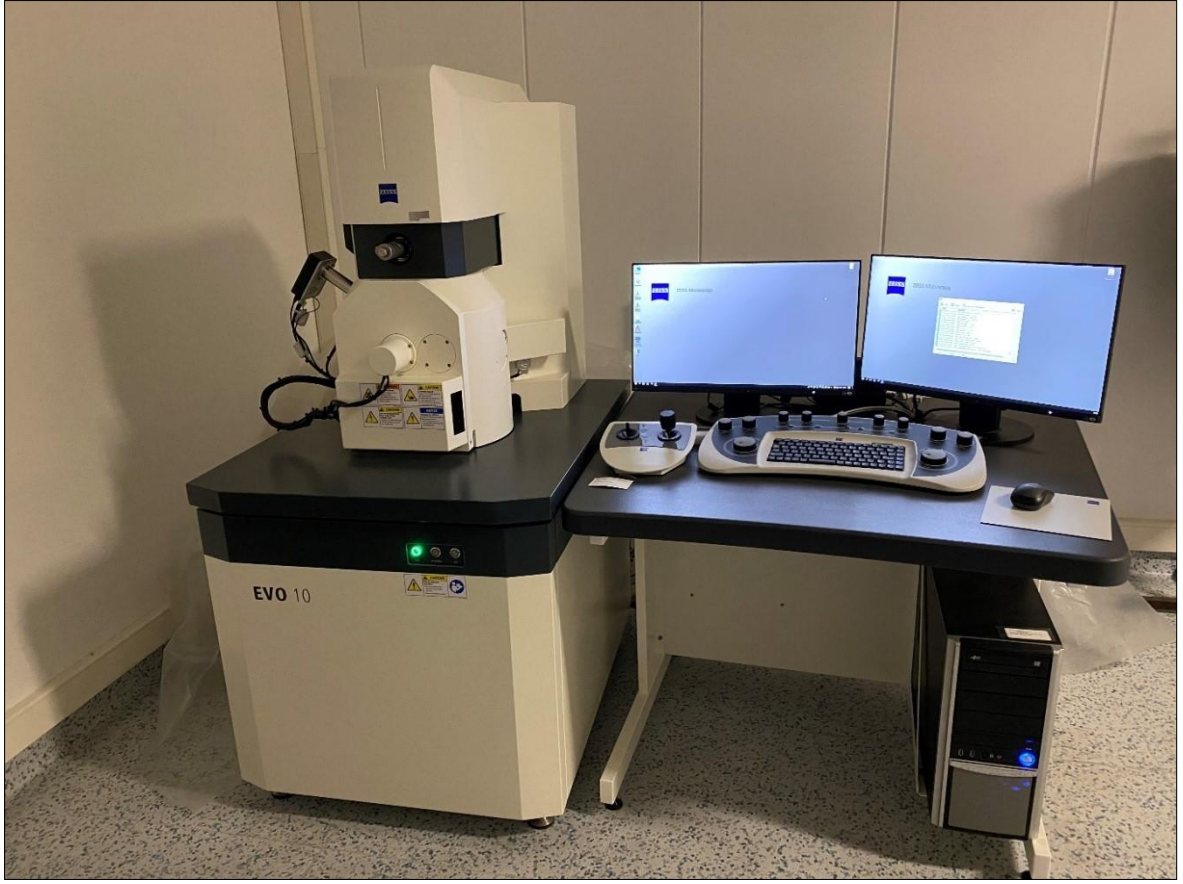
W_2 = Son Tartım (mg)

Sınıf 1A, tip I Krom VI içeren kaplama türü olup, kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına 430miligramdan az olmamalıdır.

Sınıf 1A, tip II Krom VI içermeyen kaplama türü olup, kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına 107,5 miligramdan az olmamalıdır[61].

8.3.5. Karakterizasyon

Kaplama yapılan panellerin yüzey morfolojisini incelemek için karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları için Çizelge 8.7. da belirtilen adet ve ölçülerdeki alaşımların kaplamaları yapıldıktan sonra, panellerin yüzey incelemesi tuz püskürtme testinden sonra Resim 8.4 'te gösterilen Zeiss Evo-10 taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) yapılmıştır. Her bir kaplama solüsyonu için 2024-T3 alaşımlı panellerden üçer adet kaplanmış numune ve karşılaştırma için de üçer adet kaplanmamış numune hazırlanmıştır. Karşılaştırma panelleri, kaplama banyosu öncesindeki ön hazırlık banyolarında aynı sürelerde durarak yüzeyleri hazırlanmıştır. Her bir kaplama türü için hazırlanan altışar adet test panelituz püskürtme kabinine yerleştirilmiştir. 1 gün, 7 gün ve 14 gün sonunda bir kaplanmış bir de kaplanmamış test paneli kabinden çıkarılarak taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) yüzey morfolojisi incelenmiştir.



Resim 8.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

9. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

9.1. Korozyon Direnci Testi Sonuçları

Her bir kaplama türü için hazırlanan, Çizelge 8,7’de adeti, alaşımı ve ölçüleri belirtilen paneller, korozyon direnci testi için tuz püskürtme kabinine yerleştirilmiştir. Çizelge 9.1,Çizelge 9.2ve Çizelge 9.3 de belirtilensüreler sonunda paneller alınıp saf su ile temizlenerek tuz püskürtme testine maruz kalmayan kontrol panelleriyle karşılaştırılarak kontrol edilmiştir.

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde 168 saat sonunda tuz püskürtme testine maruz kalan üç farklı alaşımda da herhangi bir korozyon çukurunarastlanmamıştır. Ancak,336 saat sonrasında 2024-T3 alaşımlı panellerde 2 adet korozyon çukuruna rastlanırken, 7075-T6 alaşımlı panellerde 3 adet, 6061-T6 alaşımlı panellerde ise 4 adet korozyon çukuruna rastlanmıştır.

Çizelge 9.1. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması korozyon direnci test sonuçları

Alaşım	Panel No	Kabinde Durma Süresi (saat)											
		24	96	168	264	336	432	480	600	768	840	912	960
2024-T3 Kladsiz	1	0	0	0	0	0	1	3	4	5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	0	1	2	3	3	4	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	0	1	4	4	>5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	0	2	4	>5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	3	4	5	5	>5	>5	>5
6061-T6	1	0	0	0	0	1	3	4	>5	>5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	0	0	2	4	4	>5	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	1	2	4	4	>5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	1	2	3	5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	3	5	5	>5	>5	>5	>5
7075-T6	1	0	0	0	0	1	2	4	4	5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	0	0	1	4	4	>5	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	0	1	2	4	5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	1	2	3	5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	1	3	3	4	>5	>5	>5



Resim 9.1. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin 168 saat sonraki görüntüleri

Silan kaplaması yapılan test panellerinde 264 saat sonunda tuz püskürtme testine maruz kalan 6061-T6 alaşımlı panellerde 2 adet korozyon çukuruna rastlanırken, 2024-T3 ve 7075-T6 alaşımlı panellerde korozyon çukuruna rastlanmıştır. Ancak, 336 saat sonunda 2024-T3 alaşımlı panellerde 6 adet korozyon çukuruna rastlanırken, 7075-T6 alaşımlı panellerde 7 adet, 6061-T6 alaşımlı panellerde ise 8 adet korozyon çukuruna rastlanmıştır.

Çizelge 9.2. Silan kaplaması korozyon direnci test sonuçları

Alaşım	Panel No	Kabinde Durma Süresi (saat)											
		24	96	168	264	336	432	480	600	768	840	912	960
2024-T3 Kladsiz	1	0	0	0	0	1	3	4	>5	>5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	0	2	4	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	0	2	3	>5	>5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	2	4	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	1	4	>5	>5	>5	>5	>5
6061-T6	1	0	0	0	1	2	3	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	1	3	4	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	1	1	2	>5	>5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	1	2	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	4	>5	>5	>5	>5	>5	>5
7075-T6	1	0	0	0	0	0	2	4	>5	>5	>5	>5	>5
	2	0	0	0	0	1	2	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	3	0	0	0	0	3	4	5	>5	>5	>5	>5	>5
	4	0	0	0	0	2	3	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	5	0	0	0	0	1	2	5	>5	>5	>5	>5	>5

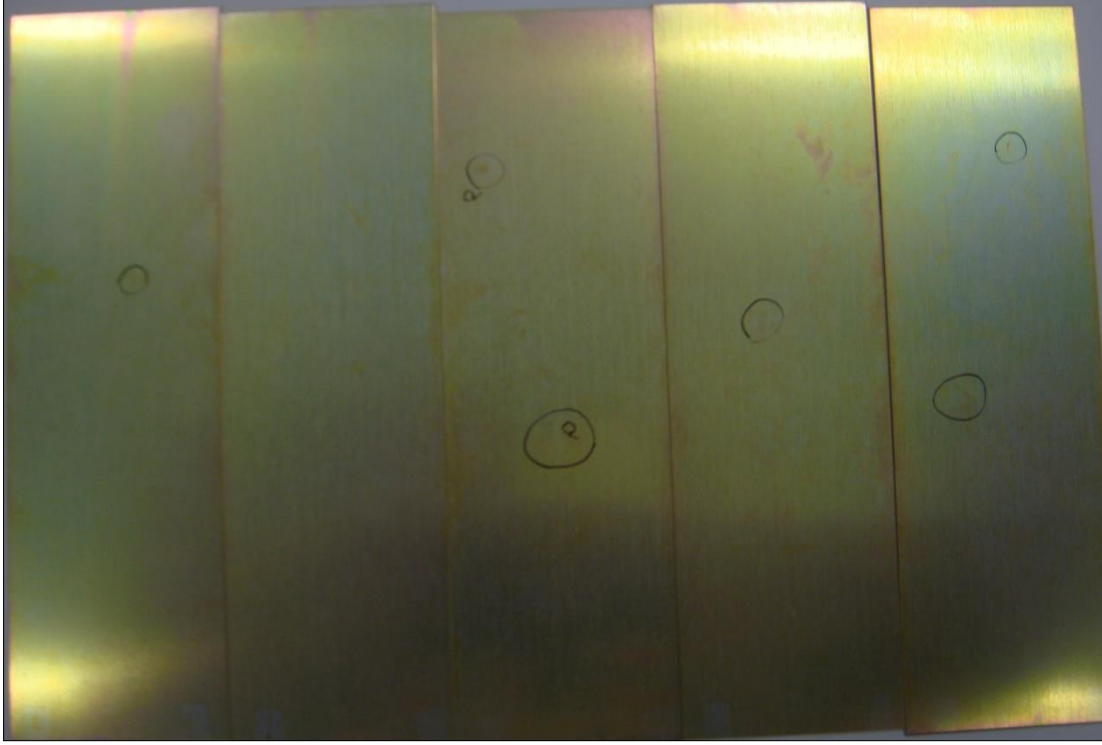


Resim 9.2. Silan kaplaması yapılmış 6061-T6 panellerin 480 saat sonraki görüntüleri

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde ise 336 saat sonunda tuz püskürtme testine maruz kalan üç farklı alaşımda da herhangi bir korozyon çukuruna rastlanmamıştır. Ancak, 2024-T3 alaşımlı panellerde 480 saat sonrasında ilk korozyon çukuruna rastlanırken 432 saat sonrasında 7075-T6 alaşımlı panllerde 1 adet, 6061-T6 alaşımlı panellerde ise 2 adet korozyon çukuruna rastlanmıştır.

Çizelge 9.3. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması korozyon direnci test sonuçları

Alaşım	Panel No	Kabinde Durma Süresi (saat)											
		24	96	168	264	336	432	480	600	768	840	912	960
2024-T3 Kladsiz	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	>5
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	>5
	3	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	>5
	4	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	5	>5
	5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	4	5	>5
6061-T6	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	4	>5	>5
	2	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	>5
	3	0	0	0	0	0	1	1	1	2	4	>5	>5
	4	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	5	>5
	5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	>5	>5
7075-T6	1	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	>5
	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	5	>5
	3	0	0	0	0	0	1	2	1	2	3	4	>5
	4	0	0	0	0	0	0	1	1	2	4	4	>5
	5	0	0	0	0	0	0	2	0	1	3	5	>5



Resim 9.3. Krom IV kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 7075-T6 panellerin 480 saat sonraki görüntüleri

Herbir kaplama türü ile kaplanmamış test panellerinin korozyon direnci test sonuçları incelendiğinde, tüm kaplama türleri MIL-DTL-81706 standardının gerekliliklerine uygun olarak 168 saat tuz püzkürtme testini geçerek, hiçbir alaşımlı panelde korozyon gözlemlenmemiştir. Ancak, yapılan karşılaştırma sonucunda silan kaplaması yapılan panellerde daha önce korozyon gözlemlenirken sonrasında krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde korozyon gözlemlenmiştir. En uzun süre korozyona dayanan kaplama türü ise krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerdir. Krom içerdikleri için yüzey kaplamalarının alaşımlı metallere yapışma performansı çok yüksek olması nedeniyle krom III ve krom VI içeren kaplama türlerinde korozyon oluşmasının daha geç olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak alaşımların korozyon başlama ve oluşan korozyon adetleri her bir kaplama türünde kendi içinde karşılaştırıldığında 6061-T6 alaşımlı panellerde ilk korozyon çukuruna rastlanmıştır. Sonrasında ise korozyon çukurlarının hem adet hemde oluşma süreleri değerlendirildiğinde sırası ile 7075-T6 ve 2024-T3 alaşımlı panellerde korozyonun olduğu gözlemlenmiştir. Alaşımların kimyasal bileşimleri göz önüne alındığında, alaşım kompozisyonu görece düşük olması nedeniyle 6061-T6 alaşımlı panellerde ilk korozyon çukurcuğu gözlemlenmiştir.

9.2. Boya Yapışma Testi Sonuçları

Çizelge 8.7. de belirtilen alaşım, ölçü ve adetteki kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellere, 24 saat bekledikten sonra MIL-PRF-23377 standardına göre üretilmiş epoksi-poliamid astar boya, 15 ile 25 μ arasında kuru film kalınlığında bir kat uygulanmıştır. Uygulama yapıldıktan sonra test panelleri 7 gün kurumaya bırakılmıştır. Kuruduktan sonra girdap akım kalınlık ölçüm cihazı ile her bir panelde 10 farklı noktadan kalınlık değerleri ölçülmüştür. 15 ile 25 μ aralığındaki kuru film kalınlığında olan her bir alaşımdan üçer adet panele ISO 2409 standardında belirtildiği gibi 1 mm aralıklar ile kaplamaya dik açılı olarak metale inecek şekilde 6 paralel çizgi ve bu çizgilere de dik olarak 6 paralel çizgi ile 25 küçük kareden oluşan kafes deseni kesilip 1 inch genişliğinde 3M 250 nolu bant, kesilen yüzeye tüm yüzeyi temas edecek şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırılan bu bant 60° lik açı ile hızlıca kaldırılarak Çizelge 8.11. de belirtilen sınıflandırmaya göre yüzey değerlendirilmiştir. Her bir panel için astar boya kalınlık ve sınıflandırma sonuçları Çizelge 9.4, Çizelge 9.5. ve Çizelge 9.6. da belirtilmiştir.

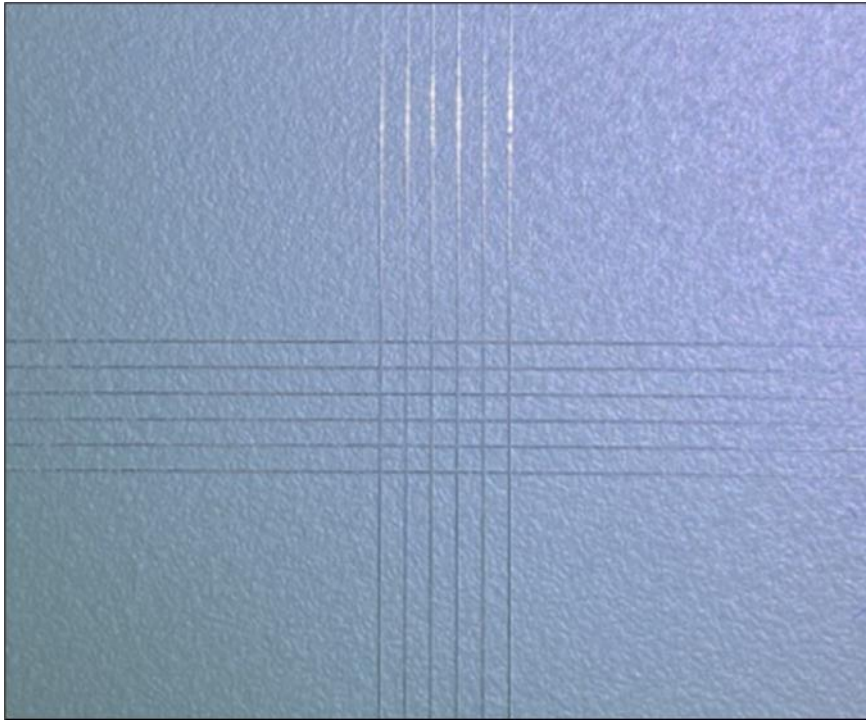
Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık 23,32 μ m gelirken en düşük 16,71 μ m ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise tüm panellerdeki 25 küçük kareden oluşan kafes deseni incelenmiş olup hiçbir panelde herhangi bir kalkma gözlemlenmediğinden Çizelge 8.11. e göre sınıf 0 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.4. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μ m)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	23,32 $\pm$ 2,7	0	0
	2		20,53 $\pm$ 1,9	0	0
	3		18,12 $\pm$ 1,6	0	0
6061-T6	1		20,64 $\pm$ 1,7	0	0
	2		17,49 $\pm$ 2,2	0	0
	3		21,07 $\pm$ 1,7	0	0
7075-T6	1		18,91 $\pm$ 2,3	0	0
	2		16,71 $\pm$ 1,6	0	0
	3		22,45 $\pm$ 2,5	0	0



Resim 9.4. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin boya yapışma testi sonrası görüntüleri



Rsim 9.5. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılmış 2024-T3 panelin boya yapışma testi sonrası bant testi yapılmış yüzey detay görüntüsü

Silan kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık 22,75 μm gelirken en düşük 17,12 μm ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise 2024-T3 alaşımlı panellerin birinde 25 karenin %5'inin altında (Sınıf 1) kalkma gözlemlenmiş olup, 6061-T6 alaşımlı panellerin ikisinde 25 karenin %5'inin altında (Sınıf 1) kalkma gözlemlenmiştir. Ancak, 7075-T6 alaşımlı panellerdeki 25 kareden oluşan kafes desenlerinde hiçbir kalkma gözlemlenmediğinden Çizelge 8.11. e göre Sınıf 0 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.5. Silan kaplaması boya yapışma testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μm)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	20,73 $\pm$ 2,1	%0-5	1
	2		22,02 $\pm$ 1,6	0	0
	3		21,24 $\pm$ 1,9	0	0
6061-T6	1		20,30 $\pm$ 1,8	%0-5	1
	2		19,51 $\pm$ 2,3	0	0
	3		17,12 $\pm$ 1,6	%0-5	1
7075-T6	1		19,68 $\pm$ 2,7	0	0
	2		22,75 $\pm$ 1,8	0	0
	3		18,82 $\pm$ 2,0	0	0

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık 23,05 μm gelirken en düşük 17,31 μm ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise tüm panellerdeki 25 küçük kareden oluşan kafes deseni incelenmiş olup hiçbir panelde herhangi bir kalkma gözlemlenmediğinden Çizelge 8.11'e göre sınıf 0 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.6. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μm)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	19,79 $\pm$ 1,9	0	0
	2		22,44 $\pm$ 2,2	0	0
	3		21,13 $\pm$ 1,8	0	0
6061-T6	1		18,91 $\pm$ 2,1	0	0
	2		21,68 $\pm$ 1,7	0	0
	3		22,21 $\pm$ 1,6	0	0
7075-T6	1		17,31 $\pm$ 2,0	0	0
	2		23,05 $\pm$ 1,5	0	0
	3		19,59 $\pm$ 2,2	0	0

Saf suda bekletildikten sonra yapılan boya yapışma testi için ise her bir alaşımdan kalan üçer panel, 7 günün sonunda saf suyun içine daldırılarak 14 gün boyunca 23 ± 2 °C de beklemiştir. 14günün sonunda çıkartılan paneller kurulandıktan sonra, yarım saat içerisinde yine 1 mm aralıklar ile kaplamaya dik açılı olarak metale inecek şekilde 6 paralel çizgi ve bu çizgilere de dik olarak 6 paralel çizgi ile 25 küçük kareden oluşan kafes deseni kesilip 1 inch genişliğinde 3M 250 nolu bant, kesilen yüzeye tüm yüzeyi temas edecek şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırılan bu bant 60° lik açı ile hızlıca kaldırılarak Çizelge 8.11 de belirtilen sınıflandırmaya göre yüzey değerlendirilmiştir. Her bir panel için astar boya kalınlık ve sınıflandırma sonuçları Çizelge 9.7, Çizelge 9.8 ve Çizelge 9.9’da belirtilmiştir.

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık 22,55 μm gelirken en düşük 16,89 μm ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise 2024-T3 alaşımlı panellerin birinde 25 karenin %5 inin altında (Sınıf 1) kalkma gözlemlenirken, 6061-T6 ve 7075-T6 alaşımlı panellerdeki 25 kareden oluşan kafes desenlerinde hiçbir kalkma gözlemlenmediğinden Çizelge 8.11’e göre Sınıf 0 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.7. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μm)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	$22,55 \pm 1,7$	0	0
	2		$21,03 \pm 2,0$	%0-5	1
	3		$19,71 \pm 1,9$	0	0
6061-T6	1		$20,21 \pm 1,6$	0	0
	2		$16,89 \pm 1,7$	0	0
	3		$21,17 \pm 2,4$	0	0
7075-T6	1		$19,31 \pm 1,5$	0	0
	2		$18,32 \pm 1,8$	0	0
	3		$20,40 \pm 2,3$	0	0

Silan kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık 21,48 μm gelirken en düşük 17,33 μm ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise 2024-T3 alaşımlı panellerin birinde 25 karenin %5 inin altında (Sınıf 1) kalkma gözlemlenirken, 6061-T6 alaşımlı panellerin de sadece birinde 25 karenin %5 inin altında (Sınıf 1) kalkma gözlemlenmiştir. Ancak, 7075-T6 alaşımlı panellerin ikisinde 25 karenin %5 inin altında

(Sınıf 1) kalkma gözlemlenirken, birinde ise 25 karenin %5-15 arasında kalkma gözlemlendiğinden Çizelge 8.11'e göre Sınıf 2 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.8. Silan kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μm)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	$17,81 \pm 2,4$	0	0
	2		$19,65 \pm 2,7$	%0-5	1
	3		$17,92 \pm 2,5$	0	0
6061-T6	1		$17,83 \pm 2,4$	%0-5	1
	2		$19,07 \pm 2,5$	%5-15	2
	3		$20,88 \pm 2,6$	%0-5	1
7075-T6	1		$18,12 \pm 2,1$	0	0
	2		$17,33 \pm 2,4$	%0-5	1
	3		$21,48 \pm 2,6$	0	0

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde en yüksek kalınlık $24,44 \mu\text{m}$ gelirken en düşük $19,32 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Bant testi sonrasında yapılan görsel incelemede ise tüm panellerdeki 25 küçük kareden oluşan kafes deseni incelenmiş olup hiçbir panelde herhangi bir kalkma gözlemlenmediğinden Çizelge 8.11'e göre sınıf 0 olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.9. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması boya yapışma testi sonuçları (14 gün saf suda bekletildikten sonra)

Alaşım	Panel No	Boya	Kalınlık (μm)	Kalkma Oranı (%)	Sınıf
2024-T3 Kladsiz	1	Epoksi-poliamid astar boya	$24,44 \pm 2,1$	0	0
	2		$22,03 \pm 2,4$	0	0
	3		$20,11 \pm 1,9$	0	0
6061-T6	1		$19,62 \pm 1,8$	0	0
	2		$21,62 \pm 2,6$	0	0
	3		$20,41 \pm 2,3$	0	0
7075-T6	1		$19,32 \pm 2,1$	0	0
	2		$19,79 \pm 1,7$	0	0
	3		$20,72 \pm 2,0$	0	0

Üç yüzey kaplama kimyasalı ile kaplanmış test panellerine astar boya uygulandıktan sonra film kalınlıkları ölçülmüş ve bu panellerin kalınlıkları, boya yapışma testi ön gerekliliği olan

15 ile 25 μ arasındaki kuru film kalınlığını karşıladığı gözlemlenmiştir. Test ön gerekliliğini karşılayan bu paneller ile 7 gün kurumaya bırakıldıktan sonra bant testi için çizilen kafes desenleri bant yapıştırılıp çekildikten sonra karşılaştırıldığında silan kaplaması yapılan panellerin altısında hiç kalkma gözlemlenmezken sadece üçünde 25 karenin %5'inin altında (Sınıf 1) kalma gözlemlenmiştir. Krom III ve krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde ise çizilen kafes desenlerinde hiçbir kalkma gözlemlenmemiştir.

Kuruduktan sonra 14 gün suda bekletilip çıkartılan panelleryarım saat içerisinde yine kafes deseni çizilip, bant yapıştırılıp çekildikten sonra karşılaştırıldığında silan kaplaması yapılan panellerin dördünde hiç kalkma gözlemlenmezken dördünde 25 karenin %5'inin altında (Sınıf 1), birinde ise % 5-15 (Sınıf 2) arasında kalma gözlemlenmiştir. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerin ise sadece birinde 25 karenin %5'inin altında (Sınıf 1) kalma gözlemlenmiştir. Ancak krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerdeçizilen kafes desenlerinde hiçbir kalkma gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde silan kaplamasının astar boya ile yapışma performansı krom içeren dönüşüm kaplamalarının boya ile yapışma performansından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Krom içerdikleri için aynı zamanda astar boya ile yapışma performansı yüksek olması nedeniyle krom III ve krom VI içeren kaplama türlerinde hiçbir ayrılma gözlemlenmemiştir. Kalkma gözlemlenen paneller incelendiğinde çoğunlukla 6061-T6 alaşımlı panellerden kalması, ayrılmanın kaplama ile metal arasından olabileceğini desteklemektedir. Ancak silan kaplama yapılan panellerde kuruduktan sonra en çok sınıf 1, 14 gün suda bekledikten sonra ise en çok sınıf 2 kalkma gözlemlendiğinden her üç kaplama çeşidi de boya yapışma gerekliliklerini karşılamaktadır.

9.3. Elektriksel Direnç Testi Sonuçları

Elektriksel temas direnç testi için Çizelge 8.7. de belirtilen alaşım, ölçü ve adetteki kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerden, 24 saat boyunca oda şartlarında kurumaya bırakıldıktan sonra ve 24 saat sonrasında 168 saattuz püskürtme testine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılmıştır. Test panellerinin temas elektrik dirençleri her panelde on ölçü olmak üzere inç kare başına 200 pound (psi) uygulanan bir elektrot basıncı ile ölçülmüştür. Her bir panel için elektriksel temas direnç testi sonuçları Çizelge 9.10, Çizelge 9.11 ve Çizelge 9.12'de belirtilmiştir.

MIL-DTL-81706 standardına göre düşük elektrik direnci gerekli olduğu yerlerde sınıf 3 kaplama uygulanır. Düşük elektrik direnci elde etmek için kaplama kalınlığı minimum uygulanmıştır. 6061 malzemesinin alaşım miktarı diğer alaşımlara göre oldukça düşük olduğunda korozyona karşı direnci diğer alaşımlara göre daha yüksektir. Bu yüzden bu test için, sınıf 3 kaplama istendiği yerlerde, yani düşük kaplama kalınlığı ve düşük elektrik direncine gerekli olduğu yerlerde 6061 alaşımı kullanılmıştır.

MIL-DTL-81706 standardına göre paneller test edildiğinde 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapılanlar $5.000 \mu\Omega$ 'dan ve 24 saat sonrasında 168 saat tuz spreylene maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılanlar $10.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olmamalıdır. Tüm okumaların ortalamasının belirtilen maksimum direnci aşmaması koşuluyla, belirtilen maksimum değerleri aşan, %20'den fazla olmayan bireysel okumalar kabul edilebilir.

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panelleri 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel $2.915 \mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak $4.970 \mu\Omega$ ölçülmüştür. Ancak 168 saat tuz spreylene maruz kaldıktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel $3.451 \mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak $8.610 \mu\Omega$ ölçülmüştür.

Çizelge 9.10. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Test Şartı	Ortalama elektiriksel direnç 200 psi basınçta (Her panelde 10 okuma) ($\mu\Omega$ psi)	Her paneldeki Maksimum okuma ($\mu\Omega$ psi)
6061-T6	1	Korozyon Direnci Testi Öncesi	1.069	4.500
	2		1.967	4.890
	3		1.825	4.480
	4		2.915	4.970
	5		2.567	4.150
	1	168 saat Korozyon Direnci Testi Sonrası	2.609	6.600
	2		1.579	2.743
	3		2.399	3.986
	4		3.451	8.610
	5		3.007	7.900

Silan kaplaması yapılan test panelleri 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel $3.643 \mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak

5.310 $\mu\Omega$ ölçülmüştür. Ancak 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel 6.310 $\mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak 11.540 $\mu\Omega$ ölçülmüştür.

Çizelge 9.11. Silan kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Test Şartı	Ortalama elektrikişel direnç 200 psi basınçta (Her panelde 10 okuma) ($\mu\Omega$ psi)	Her paneldeki Maksimum okuma ($\mu\Omega$ psi)
6061-T6	1	Korozyon Direnci Testi Öncesi	3.643	5.310
	2		1316	2.206
	3		1.348	3.024
	4		5.46	1.036
	5		1.787	2.976
	1	168 saat Korozyon Direnci Testi Sonrası	1.725	3.574
	2		1.616	4.528
	3		4.993	9.120
	4		4.373	8.200
	5		6.310	11.540

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panelleri 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel 2.718 $\mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak 4.880 $\mu\Omega$ ölçülmüştür. Ancak 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapıldığında ortalama en yüksek panel 1.913 $\mu\Omega$ ölçülürken en yüksek bireysel değer olarak 9.690 $\mu\Omega$ ölçülmüştür.

Çizelge 9.12. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması elektriksel direnç testi sonuçları

Alaşım	Panel No	Test Şartı	Ortalama elektrikişel direnç 200 psi basınçta (Her panelde 10 okuma) ($\mu\Omega$ psi)	Her paneldeki Maksimum okuma ($\mu\Omega$ psi)
6061-T6	1	Korozyon Direnci Testi Öncesi	1.010	1.920
	2		2.718	4.880
	3		2.289	4.100
	4		1.873	3.180
	5		1.048	2.439
	1	168 saat Korozyon Direnci Testi Sonrası	1.489	4.140
	2		338	711
	3		1.337	2.579
	4		1.913	9.690
	5		1.075	3.723

Herbir kaplama türü ile kaplanamış test panellerinin elektriksel direnç test sonuçları incelendiğinde, tüm kaplama türleri MIL-DTL-81706 standardının gerekliliklerine uygun olarak, 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapılanların ortalamasının $5.000 \mu\Omega$ 'dan ve 24 saat sonrasında 168 saat tuz spreylene maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılanların ortalamasının $10.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olmadığı gözlemlenmiştir. Silan kaplaması yapılan panellerin sonuçları incelendiğinde, 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapılan panellerde bir adet bireysel okuma $5.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olup $5.310 \mu\Omega$ ölçülürken, 24 saat sonrasında 168 saat tuz spreylene maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılan panellerde de bir adet bireysel okuma $10.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olup $11.540 \mu\Omega$ ölçülmüştür. Ancak bu değerler, belirtilen maksimum değerleri %20 den fazla aşmadığı için ve tüm okumaların ortalamaları belirtilen maksimum direnç değerlerini aşmadığı için standardın gerekliliklerine uygun olarak değerlendirilmiştir. Krom III ve krom VI içeren kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerin sonuçları incelendiğinde, bireysel okuma değerlerinin, belirtilen maksimum direnç değerlerini aşmadığı gözlemlenmiştir. Her üç kaplama türü karşılaştırıldığında, hem tuz spreyi öncesi ölçüm değerleri, hemde tuz spreylene maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılan test panellerinin değerleri, en yüksek silan kaplaması yapılanlarda gözlemlenirken, sonraki en yüksek değerler krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde gözlemlenmiştir. En düşük elektrik direncine sahip kaplama türü ise krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerdir. Krom içerdikleri için yüzey kaplamalarının alaşımlı metallere yapışma performansı çok yüksek olması nedeniyle krom III ve krom VI içeren kaplama türlerinde korozyon oluşmasının geç olması, 168 saat sonraki bireysel okumaların belirtilen maksimum değerleri geçmemesine neden olduğu değerlendirilmiştir. Krom içeren kaplama türlerinin inorganik yapıları nedeni ile elektriksel dirençlerinin daha düşük olduğu, organik yapısı nedeni ile ise silan kaplamanın elektriksel direncinin daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir.

9.4. Kaplama Ağırlığı Sonuçları

Her bir kaplama türü için hazırlanan, Çizelge 8.7. de belirtilen alaşım, ölçü ve adetteki kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerin ağırlıkları, dönüşüm kaplaması uygulandıktan sonraki 3 saat içerisinde 0,1 miligram hassasiyette terazi ile tartılarak ilk tartım sonuçları kaydedilmiştir. Tartıldıktan hemen sonra dönüşüm kaplaması panellerden sökülüp tekrar tartılıp son tartım sonuçları kaydedilmiştir. Her bir panel için ilk tartım, son

tartımve kaplama ağırlık sonuçları Çizelge 9.13, Çizelge 9.14, ve Çizelge 9.15 ‘de belirtilmiştir.

MIL-DTL-81706 standardına göre korozyona karşı maksimum koruma gerekli olduğu yerlerde sınıf 1A kaplama uygulanır. Korozyona karşı maksimum koruma için kaplama kalınlığı maksimum uygulanmıştır. 2024 ve 7075 malzemelerinin alaşım miktarı diğer alaşımlara göre oldukça yüksek olduğunda korozyona karşı direnci diğer alaşımlara göre daha düşüktür. Bu yüzden bu test için, sınıf 1A kaplama istendiği yerlerde, yani yüksek kaplama kalınlığı ve korozyona karşı maksimum koruma gerekli olduğu yerlerde 2024 ve 7075 alaşımı kullanılmıştır.

Sınıf 1A, tip I Krom VI içeren kaplama türü olup, kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına 430 miligramdan az olmamalıdır.

Sınıf 1A, tip II Krom VI içermeyen kaplama türü olup, kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına 107,5 miligramdan az olmamalıdır.

Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 272,4mg/m²iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 254,5mg/m²ölçülmüştür.

Çizelge 9.13. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları

Alaşım	Panel No	Panel Yüzey Alanı (m ²)	W1 (İlk Tartım) (mg)	W2 (Son Tartım) (mg)	Kaplama Ağırlığı (mg/m ²)	Kaplama Sınıf, Tip
2024-T3 Kladsiz	1	0,01875	21103,56	21097,69	312,6	Sınıf 1A, Tip II
	2		21194,20	21190,03	222,5	
	3		20904,79	20899,58	277,9	
7075-T6	1		20926,53	20922,01	240,7	
	2		20809,66	20804,82	258,0	
	3		21033,23	21028,26	264,9	

Silan kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 170,8mg/m²iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 177,2mg/m²ölçülmüştür.

Çizelge 9.14. Silan kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları

Alaşım	Panel No	Panel Yüzey Alanı (m ²)	W1 (İlk Tartım) (mg)	W2 (Son Tartım) (mg)	Kaplama Ağırlığı (mg/m ²)	Kaplama Sınıf, Tip
2024-T3 Kladsiz	1	0,01875	20883,44	20880,08	179,2	Sınıf 1A, Tip II
	2		20813,36	20810,28	164,5	
	3		20980,26	20977,09	168,8	
7075-T6	1		20962,66	20958,94	198,3	
	2		21063,51	21059,94	190,5	
	3		20729,45	20726,74	144,6	

Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 456,7 mg/m² iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı 512,3mg/m² ölçülmüştür.

Çizelge 9.15. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması kaplama ağırlığı sonuçları

Alaşım	Panel No	Panel Yüzey Alanı (m ²)	W1 (İlk Tartım) (mg)	W2 (Son Tartım) (mg)	Kaplama Ağırlığı (mg/m ²)	Kaplama Sınıf, Tip
2024-T3 Kladsiz	1	0,01875	21261,27	21254,51	475,2	Sınıf 1A, Tip I
	2		21283,52	21277,66	443,7	
	3		20985,32	20979,30	451,2	
7075-T6	1		20976,93	20970,10	497,4	
	2		20604,69	20597,50	530,6	
	3		21051,54	21045,44	508,9	

Üç yüzey kaplama kimyasalı ile kaplanmış test panellerinin kaplama ağırlığı sonuçları incelendiğinde, tüm kaplama türleri MIL-DTL-81706 standardı kaplama ağırlığı gerekliliklerini karşılamaktadır. Sınıf 1A, tip II krom VI içermeyen kaplama türleri için, kaplama ağırlığı, standart gerekliliği olan 107,5 mg/m²'dan fazla olup, silan kaplaması için ortalama 174,3 mg/m², krom III kimyasal dönüşüm kaplaması için ise 262,8 mg/m² olarak ölçülürken, sınıf 1A, tip I krom VI içeren kaplama için, kaplama ağırlığı, standart gerekliliği olan 430 mg/m²'dan fazla olarak, 484,5 mg/m² olarak ölçülmüştür. Krom VI iyonu içerdikleri için yüzey kaplamalarının alaşımlı metallere yapışma performansı yüksek olması nedeniyle krom VI içeren kaplama türlerinde kaplama ağırlık sonuçlarının yüksek olması standart gereklilikleri ile karşılaştırıldığında benzerlik göstermiştir. Bunun yanında krom içerikli yüzey kaplamalarının alaşımlı metallere yapışma performansı yüksek olması

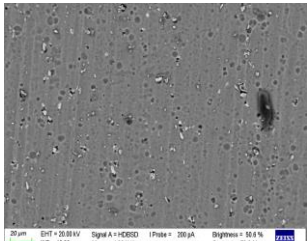
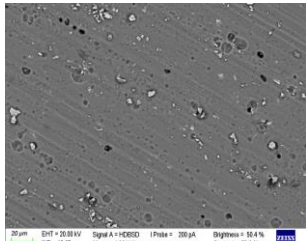
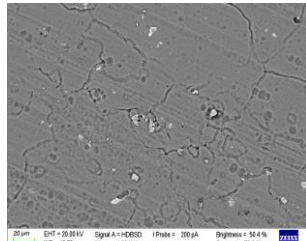
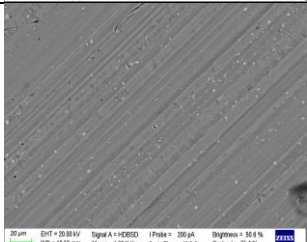
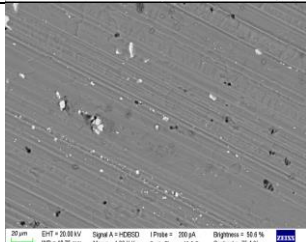
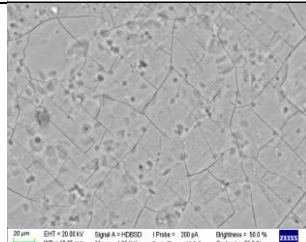
nedeniyle krom III içeren kaplamanın, silan kaplamaya göre kaplama ağırlık sonuçlarının yüksek olduğu görülmüştür.

Genel olarak alaşımların kaplama ağırlık sonuçları, her bir kaplama türünde kendi içinde karşılaştırıldığında, belirgin bir fark gözlemlenmediğinden 2024-T3 ve 7075-T6 alaşımlarının kaplama ağırlığına etkisi olmadığı görülmüştür.

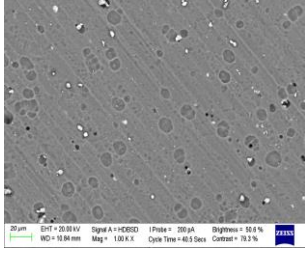
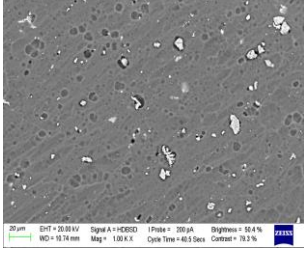
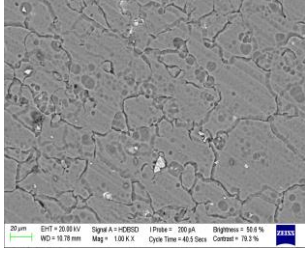
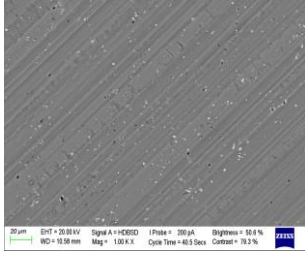
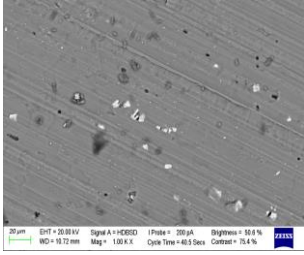
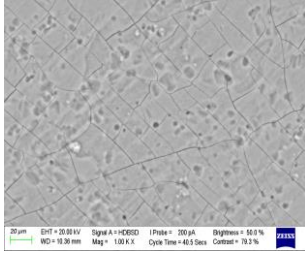
9.5. SEM Sonuçları

Hava araçlarında dış kabukta en çok 2024 alüminyum alaşımı kullanılır. Bu yüzden karakterizasyon test çalışması için de 2024 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Her bir kaplama türü ile kaplanmış ve karşılaştırma amacıyla kaplanmamış 2024-T3 panellerinin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabininde bekledikten sonra 1000 kat büyütme ile SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir. Çizelge 9.16, Çizelge 9.17 ve Çizelge 9.18’de görüleceği gibi önemli korozyon çukuruna ve anlamlı morfoloji değişimine rastlanmamıştır. Ancak kaplama olmayan panellerde korozyon çukurları ve morfoloji değişimleri gözlemlenmiştir. Özellikle 72 saat sonra kaplamasız panellerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde korozyon çukurlarının ciddi şekilde arttığı gözlemlenirken 168 saat sonra yine kaplamasız plakalardaki görüntülerde ise morfoloji değişimlerine rastlanmıştır.

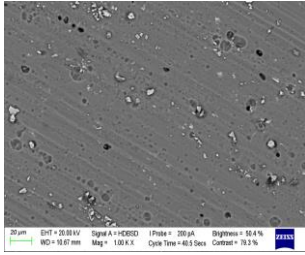
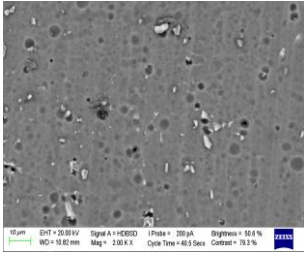
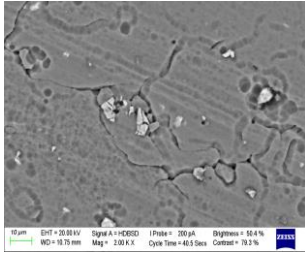
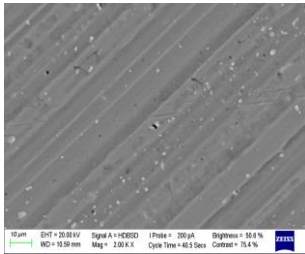
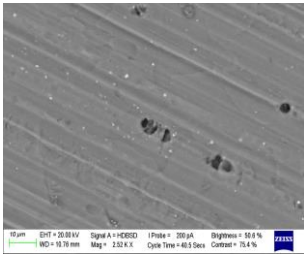
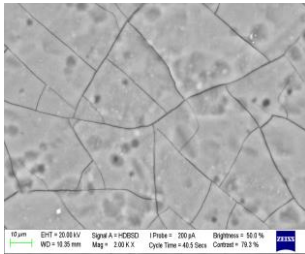
Çizelge 9.16. Krom III kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabininde bekledikten sonraki SEM görüntüleri

İşlem	Kabinde Durma Süresi (Saat)		
	24	72	168
Cr (III) Kaplama			
Kaplamasız			

Çizelge 9.17. Silan kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabininde bekledikten sonraki SEM görüntüleri

İşlem	Kabinde Durma Süresi (Saat)		
	24	72	168
Silan Kaplama			
Kaplamasız			

Çizelge 9.18. Krom VI kimyasal dönüşüm kaplaması ile kaplanmış ve kaplanmamış 2024-T3 panellerin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabininde bekledikten sonraki SEM görüntüleri

İşlem	Kabinde Durma Süresi (Saat)		
	24	72	168
Cr(VI) Kaplama			
Kaplamasız			

10. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum malzemelerin, elektrik iletkenlik özelliğini değiştirmeden metalin korozyon direncini arttırmak için uygulanan kimyasal kaplama yöntemleri incelenmiştir. Bu doğrultuda korozyon direncinin arttırmak için kanserojen olan Cr(VI) içermeyen yüzey kaplamaları hazırlanmış, performansları incelenmiş ve kromat içermeyen kaplamaların, Cr(VI) içeren kaplamalar ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Hazırlanan bu kaplama kimyasalları ile havacılık endüstrisinde en çok kullanılan 2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6 yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına kimyasal ön temizleme işlemleri uygulandıktan sonra kaplamalar yapılmıştır. Bu panellere TCP kaplama; Cr(III) içerikli, krom içermeyen kaplama; silan içerikli ve günümüzde yaygın olarak kullanılan Cr(VI) içeren CCC uygulanmıştır. Kaplama yapılan bu üç yüksek mukavemetli alüminyum panellerde TCP kaplamanın (Cr(III) içerikli) ve krom içermeyen kaplamanın (silan içerikli) korozyona karşı direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı incelenerek Cr(VI) içeren CCC ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca TCP, silan kaplama ve CCC kaplaması yapılan 2024-T3 alaşımlarının yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek kaplama yapılmamış paneller ile karşılaştırılmıştır.

Bu araştırmada Cr (III) içeren dönüşüm kaplaması olarak Socomore ürünü olan Socosurf TCS ve PACS, krom içermeyen silan içerikli kimyasal dönüşüm kaplaması olarak Chemetall ürünü olan Ardrex 1768 ve Cr(VI) içeren kimyasal dönüşüm kaplaması olarak bir Henkel ürünü olan Alodine 1200-S kullanılmıştır. Bu dönüşüm kaplamalarını 2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlarına kaplayabilmek için alaşımlara ön temizleme uygulanmıştır. Ön temizlemede panellere solvent ile yağ alma, alkali temizleme ve deoksidasyon uygulanarak yüzey kaplamaları yapılmıştır. En uygun kaplanmış yüzey oluşturmak amacıyla ön temizleme, yüzey hazırlama ve kaplama proses süreleri belirlenerek kaplama yapılan bu panellerin korozyona karşı direnci, kaplama kalınlığı, elektrik iletkenliğine karşı direnci ve boya yapışma performansı değerlendirilmiş ve yapılan bu kaplama metodu, literatür ile karşılaştırılarak literatür sonuçlarının elde edilen kaplama sonuçlarını desteklemiş olduğu görülmüştür [54].

Kaplama yapılan üç yüksek mukavemetli alüminyum panellerin korozyon direnci testi sonucunda Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde 264 saat sonunda

tuz püskürtme testine maruz kalan üç farklı alaşımda da herhangi bir korozyon çukuruna rastlanmamıştır, ilk korozyon çukuruna 336 saat sonrasında her üç farklı alaşımlı panelde de rastlanmıştır. Silan kaplaması yapılan test panellerinde ise 264 saat sonunda 6061-T6 alaşımlı panellerde ilk korozyon çukuruna rastlanırken, Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde 432 saat sonunda ilk korozyon çukuruna rastlanmıştır.

Kaplanmış panellerin kuruduktan sonra yapılan boya yapışma testi için 15-25 μm aralığında uygulanan epoksi-poliamid astar boyanın kalınlığı, Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde ortalama 19,9 μm olarak ölçülürken, Silan kaplaması uygulanan panellerde 20,2 μm ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde ise 20,6 μm ölçülmüştür. Ayrıca bütün paneller ISO 2409 standardı gerekliliği olan 15-25 μm kalınlık aralığında ölçülmüştür. Boya yapışma testi için kalınlıkları uygun olan bu paneller, metale incek şekilde 1 mm aralıklı 6 paralel çizgi ve bu çizgilere de dik olarak 6 paralel çizgi ile 25 küçük kare üzerine 1 inch genişliğinde bant yapıştırıp çekilerek sonuçlar incelenmiştir. Boya kuruduktan hemen sonraki test sonuçlarında silan kaplaması yapılan test panellerinde 25 karenin %5'inin (sınıf 1) altında kalkma gözlemlenirken, Cr(III) ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde hiçbir kalkma gözlemlenmemiştir (Sınıf 0).

14 gün saf suda bekletilip sonrasında yapılan boya yapışma testi için ise yine 15-25 μm aralığında uygulanan epoksi-poliamid astar boyanın kalınlığı, Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde ortalama 20 μm olarak ölçülürken, silan kaplaması uygulanan panellerde 18,9 μm ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde ise 20,9 μm ölçülmüştür. Boya yapışma testi için kalınlıkları uygun olan bu paneller sonrasında 25 adet 1 mm² kareler çizilip bant testi uygulanmış ve silan kaplaması yapılan test panellerinde 25 karenin %5-15 (sınıf 2) arasında kalkma gözlemlenirken Cr(III) kaplamada %5 in altında (sınıf 1) kalkma gözlemlenmiştir. Ancak Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinde hiçbir kalkma gözlemlenmemiştir (sınıf 0).

Kaplama yapılan bu üç yüksek mukavemetli alüminyum panellerin elektriksel iletkenlik performansı incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik performansı incelenmesi için her bir alaşım ve kaplama türü, kaplandıktan 24 saat sonra ve 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra elektriksel temas direnç testi yapılmıştır. MIL-DTL-81706 standardına göre paneller test edildiğinde 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapılanlar 5.000 $\mu\Omega$ 'dan ve 24 saat

sonrasında 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapılanlar $10.000 \mu\Omega$ 'dan büyük olmamalıdır. Kaplama yapılan test panelleri 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm yapıldığında Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $2.915 \mu\Omega$, silan kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $3.643 \mu\Omega$ ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $2.718 \mu\Omega$ ölçülmüştür. Ancak, kaplama yapılan test panelleri 168 saat tuz spreyine maruz kaldıktan sonra ölçüm yapıldığında, Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $3.451 \mu\Omega$, silan kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $6.310 \mu\Omega$ ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan panellerde ortalama en yüksek $1.913 \mu\Omega$ ölçülmüştür. MIL-DTL-5541/81706 standardına göre elektriksel temas direnç testi sonuçları her 3 kaplama için ortalama elektriksel direnç değerleri, korozyon direnci testi öncesi $5.000 \mu\Omega$ psi, korozyon direnci testi sonrası ise $10.000 \mu\Omega$ psi değerinin altında olup standart gerekliliklerini karşılamaktadır.

Kaplanmış panellerin kaplama ağırlıkları incelenmesi için paneller dönüşüm kaplaması uygulandıktan sonraki 3 saat içerisinde $0,1$ miligram hassasiyette terazi ile tartılarak ilk tartım sonuçları kaydedilmiştir. Tartıldıktan hemen sonra dönüşüm kaplaması panellerden sökülüp tekrar tartılıp son tartım sonuçları kaydedilmiştir. MIL-DTL-5541 standardına göre Cr(VI) içeren kaplama türleri sınıf 1A, tip I, Cr(VI) içermeyen kaplama türleri ise sınıf 1A, tip II olarak tanımlanır. Sınıf 1A, tip I kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına 430 miligramdan az olmamalıdır. Sınıf 1A, tip II ise kaplama ağırlığı, yüzey alanının metrekare başına $107,5$ miligramdan az olmamalıdır. Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $272,4 \text{ mg/m}^2$ iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $254,5 \text{ mg/m}^2$ ölçülmüştür. Silan kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $170,8 \text{ mg/m}^2$ iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $177,2 \text{ mg/m}^2$ ölçülmüştür. Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması yapılan test panellerinden 2024-T3 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $456,7 \text{ mg/m}^2$ iken 7075-T6 alaşımlı olanların ortalama kaplama ağırlığı $512,3 \text{ mg/m}^2$ ölçülmüştür. MIL-DTL-5541 standardına göre kaplama ağırlık sonuçları Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması ve silan kaplaması için $107,5 \text{ mg/m}^2$ değerinin üzerinde ve Cr(VI) kimyasal dönüşüm kaplaması için ise 430 mg/m^2 değerinin üzerinde olup standart gerekliliklerini karşılamaktadır.

Gerçekleştirilen performans testleri sonucunda bu üç kaplama türünün yüzey morfolojisi incelenmesi amacıyla her bir kaplama türü ile kaplanmış ve karşılaştırma amacıyla kaplanmamış 2024-T3 panellerinin 24, 72 ve 168 saat tuz püskürtme kabininde bekledikten sonra 1000 kat büyütme ile SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucunda önemli korozyon çukuruna ve anlamlı morfoloji değişimine rastlanmamıştır. Ancak kaplama olmayan panellerde korozyon çukurları ve morfoloji değişimleri gözlemlenmiştir. Özellikle 72 saat sonra kaplamasız panellerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde korozyon çukurlarının ciddi şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bu tez çalışması sonucunda, seri üretim sırasında alüminyum alaşımlarına kaplamaların daha iyi yapışması amacıyla işlem basamaklarına yüzeyi daha iyi aktifleştirmek için ön temizleme banyosu sonrasına aşındırma oranı yüksek alkali aşındırma banyosu eklenmesi önerilebilir. Bu sayede Cr(III) kimyasal dönüşüm kaplaması ve silan kaplaması performansı arttırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Güler, K. A. (2003). *Uçak yapımında kullanılan malzemler ve özelliklerinin incelenmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul, 7-32.
2. Akdoğan, A. (2008). *Havacılık alanında teknolojik malzeme kullanımı*. Y.T.Ü. Makine Fakültesi, Kayseri VII. Havacılık Sempozyumu, Kayseri, 129-131.
3. Binczewski, G. J. (1995). The point of a monument: a history of the aluminum cap of the Washington monument. *Journal of Material*, 47, 20-25.
4. ASM International. (1992). Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Metals Hand Book*, 2, 506-507.
5. Çakanyıldırım, Ç., Gürü, M. (2021). Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 585-592.
6. DüNDAR, M. (2003). *Alüminyumun yaygın kullanımı için potansiyel uygulamalar*. II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi, Seydişehir, 14-21.
7. Karakışlak, M. (1978). *Alüminyum alaşımları ve ısı işlemleri*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60-61.
8. Vargel, C. (2004). *Corrosion of aluminum*. London: Elsevier, 98-304.
9. ASTM G69, (2009). Standard test method for measurement of corrosion potentials of aluminum alloys. *ASTM International*, 1-4.
10. Giles, C., Halliburton M., Keller S., Leonelli F. (2016). *Requirement for corrosion prevention and control program study*. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, New Jersey, 3-6
11. Revie, R. W. (2011). *Uhlig's corrosion handbook*. 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 715-718.
12. Riggs, O. L., Nathan, C. C. (1973). *Corrosion inhibitors*. NACE: Houston, TX, 11-15.
13. Noack, M. G., (1982). *Materials performance*. Materials Technology Laboratory, Ottawa, Ontario, Canada, 26.
14. ASTM G47. (2011). Standard test method for determining susceptibility to stress-corrosion cracking of 2xxx and 7xxx aluminum alloy products. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 3-5.
15. Bacon, R. C., Smith J. J., Rugg, R. M. (1948). Electrolytic resistance in evaluating protective merit of coatings on metals. *Industrial & Engineering Chemistry*, 40(1), N.J., 161-167.
16. Mayne, J. E. O. (1970). Paints for the protection of steel -a review of research into their modes of action. *British Corrosion Journal*, 5(3), 106-111.

17. Hare, C. H. (1998). Non-osmotically-induced blistering phenomena on metal. *Journal Protective Coatings Linings*, 15(7), 17-34.
18. Svoboda, M., Mleziva, J. (1984). Properties of coatings determined by anticorrosive pigments. *Prog. Org. Coat.*, 12(3), 251.
19. Joshi, S., Kulp, E. A., Fahrenholtz, W. G., O'Keefe, M. J. (2012). Dissolution of cerium from cerium-based conversion coatings on Al 7075-T6 in 0.1M NaCl solutions. *Corrosion Science*, 60, 290-295.
20. Findlay, S., Harrison, N. (2002). Why aircraft fail. *Journal of Materials Today, Elsevier Science*, 10(5), 18-26,
21. Federal Aviation Administration, (1991). Corrosion control for aircraft. *Advisory Circular, U.S. Department of Transportation*. Washington, DC, 41-46
22. Federal Aviation Administration, (2018). Corrosion control for aircraft. *Advisory Circular, U.S. Department of Transportation*. Washington, DC, 4, 5.
23. ASM International. (1992). Corrosion. *ASM Metals Hand Book*, 13, 102-107.
24. ASM International. (2002). Surface engineering. *ASM Metals Hand Book*, 5, 239-261.
25. Material Safety Data Sheet. (2013). Alodine 1200S. *Henkel Corporation*, Madison Heights, MI, 1-3.
26. Material Safety Data Sheet. (2004). Iridite 14-2. *MacDermid Industrial Solutions*, Waterbury, CT, 1-2.
27. Leggat, R. B., Taylor, S. R., Zhang, W., Buchheit, R. G. (2002). Corrosion performance of field-applied chromate conversion coatings. *Article in Corrosion*, 58(3), 283-290.
28. MIL-DTL-5541. (2006). Chemical conversion coatings on aluminum and aluminum alloys. *Military Specification, The U.S. Department of Defense*, Washington, DC, 1-11
29. Zhao, J., Frankel, G., McCreery, R. L. (1998). Corrosion protection of untreated aa-2024-t3 in chloride solution by a chromate conversion coating monitored with raman spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(7), 2258-2264.
30. Sehgal, A., Lu, D., Frankel, G. S. (1998). Pitting in aluminum thin films: supersaturation and effects of dichromate ions. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(8), 2834-2836.
31. Sedman, R. M., Beaumont, J., McDonald, T. A., Reynolds, S., Krowech, G. Howd, R. (2006). Review of the evidence regarding the carcinogenicity of hexavalent chromium in drinking water. *J. Environ. Sci. Health C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev.*, 24(1), 155-182.
32. Dayan, A. D., Paine, A. J. (2001). Mechanisms of chromium toxicity, carcinogenicity and allergenicity: Review of the literature from 1985 to 2000. *Human and Experimental Toxicology*, 20(9), 439-451.

33. Proctor, D.M., Otani, J.M., Finley, B.L., Paustenbach, D.J., Bland, J.A., Speizer, N., Sargent, E.V. (2002) Is hexavalent chromium carcinogenic via ingestion? A weight-of-evidence review. *Journal of Toxicology Environmental Health*, 65 (10), 701–746
34. Occupational Safety and Health Standards, (2006). Chromium (VI). *Occupational Safety & Health Administration*, Standard 1910.1026, 5.
35. National Institute for Occupational Safety and Health Standards. (2013). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Hexavalent Chromium. *National Institute for Occupational Safety and Health*, Washington, DC, 128, 3.
36. Hayes, S. A., Yu, P., O'Keefe, T. J., O'Keefe, M. J., Stoffer, J. O. (2002). The phase stability of cerium species in aqueous systems: I. E-pH diagram for the system. *Journal of the Electrochemical Society*, 149(12), 623.
37. Cook, R. L., Taylor, S. R. (2000). Pigment-derived inhibitors for aluminum alloy 2024-T. *Corrosion* 2000, 53, 321.
38. Hamdy, A. S., Beccaria, A. N., Temtchenko, T. (2002). Improving the corrosion protection of AA6061 T6–10% Al₂O₃ using new surface pre-treatments prior to fluoropolymer coatings. *Surface and Coating Technology*, 155(2-3), 184-189.
39. Pearlstain, F., Agarwala, V. S. (1994). Trivalent chromium solutions for sealing anodized aluminum. *The U.S. Department of Defense*, Washington, Dc, 1-12
40. Nickerson, W. C., Lipnickas, E. (2003). *Trivalent chromium conversion coatings on Al and Al-Cu alloys*. Proceedings of the 2003 Tri-Service Corrosion Conference. Las Vegas, NV, 17-21.
41. Material Safety Data Sheet. (2011). Alodine T 5900 RTU. *Henkel Corporation*, Madison Heights, MI, 1-3.
42. Material Safety Data Sheet. (2012). Alodine 5200 Makeup. *Henkel Corporation*, Madison Heights, MI, 1-2.
43. Material Safety Data Sheet. (2013). Alodine 5700 Wipes. *Henkel Corporation*, Madison Heights, MI, 2.
44. Placzankis, B.E., Miller, C.E., Mullis, B.D. (2001). Examination of nonchromateconversion coatings for aluminum armor from three final candidates using accelerated corrosion and adhesion test methods. *ARL-TR-2601; Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground*, MD, 1-13.
45. Smith, P., Miller, C. (2007). Performance of chromate-free pretreatment options for CARC systems. *ARL-TR-4049; Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground*, MD, 2-3.
46. Mahajanam, S. P. V., Buchheit, R. G. (2008). Characterization of inhibitor release from Zn-Al-[V₁₀O₂₈]⁶⁻ hydrotalcite pigments and corrosion protection from hydrotalcite-pigmented epoxy coatings. *Corrosion*, 64(3), 230-240.

47. Perryman, J. (2007). *Corrosion resistance of aluminum*. CM Waterfront Solutions, Atlanta. 64-72.
48. Kutz, M. (2012). *Handbook of environmental degradation of materials*. William Andrew. Norwich, NY, 398-402.
49. Viroulaud, R., Swiatowska, J., Seyeux, A., Zanna, S., Tardelli, J., Marcus, P. (2017). Influence of surface pretreatments on the quality of trivalent chromium process coatings on aluminum alloy. *Applied Surface Science*, 423, 927–938.
50. Guo, Y., Frankel, G.S. (2011). Characterization of trivalent chromium process coating on AA2024-T3. *Surface & Coatings Technology*, 206, 3895–3902.
51. Akanou, M., Saillard, R., Fori, B., Blanc, C., Odemer, G. (2019). Effect of trivalent chromium process on fatigue lifetime of 2024-T3 aluminium alloy. *Materials Science & Engineering*, 743, 322–326.
52. Qi, J.-T., Hashimoto, T., Walton, J.R., Zhou, X., Skeldon, P., Thompson, G.E. (2015). Trivalent chromium conversion coating formation on aluminium. *Surface & Coatings Technology*, Volume 280, 317–329.
53. Qi, J., Němcová, A., Walton, J.R., Zhou, X., Skeldon, P., Thompson G.E. (2016) Influence of pre- and post-treatments on formation of a trivalent chromium conversion coating on AA2024 alloy. *Thin Solid Films*, 616, 270–278.
54. Munson, C. A., Swain, G. M. (2017). Structure and chemical composition of different variants of a commercial trivalent chromium process (TCP) coating on aluminum alloy 7075-T6. *Surface & Coatings Technology*, 315, 150–162.
55. Li, J., Yao, C., Liu, Y., Li, D., Zhou, B., Cai, W. (2011). The hazardous hexavalent chromium formed on trivalent chromium conversion coating: The origin, influence factors and control measures. *Journal of Hazardous Materials*, 221-222, 56-61.
56. Chen, W. -K., Bai, C. -Y., Liu, C. -M., Lin, C. -S., Ger, M. -D. (2009). The effect of chromic sulfate concentration and immersion time on the structures and anticorrosive performance of the Cr(III) conversion coatings on aluminum alloys. *Applied Surface Science*, 256, 4924-4929.
57. Batan, A., Brusciotti, F., De Graeve I., Vereecken, J., Wenkin, M., Piens, M., Pireaux, J.J., Reniers, F., Terryn, H. (2009). Comparison between wet deposition and plasma deposition of silane coatings on aluminium. *Progress in Organic Coatings*, 69, 126-132.
58. Brusciotti, F., Batan, A., De Graeve I., Wenkin, M., Biessemans, M., Willem, R., Reniers, F., Pireaux, J.J., Piens, M., Vereecken, J., Terryn, H. (2010). Characterization of thin water-based silane pre-treatments on aluminium with the incorporation of nano-dispersed CeO₂ particles. *Surface & Coatings Technology*, 205, 603-613.
59. Yuan, X., Yue, Z.F., Chen, X., Wen, S.F., Li, L., Feng, T. (2015). The protective and adhesion properties of silicone-epoxy hybrid coatings on 2024 Al-alloy with a silane film as pretreatment. *Corrosion Science*, 104, 84-97.

60. Mrad, M., Montemor, M.F., Dhouibi, L., Triki, E. (2010). Deposition of hybrid 3-gptms's film on aa2024-t3: dependence of film morphology and protectiveness performance on coating conditions. *Progress in Organic Coatings*, 73, 264-271.
61. MIL-DTL-81707B, (2006). Chemical conversion materials for coating aluminum and aluminum alloys. *Military Specification, The U.S. Department of Defense*, Washington, DC, 2-8.
62. ISO 2409:2013 (2013). Paint and varnishes- cross-cut test. *International Standard*, Fourth edition, 2-13.

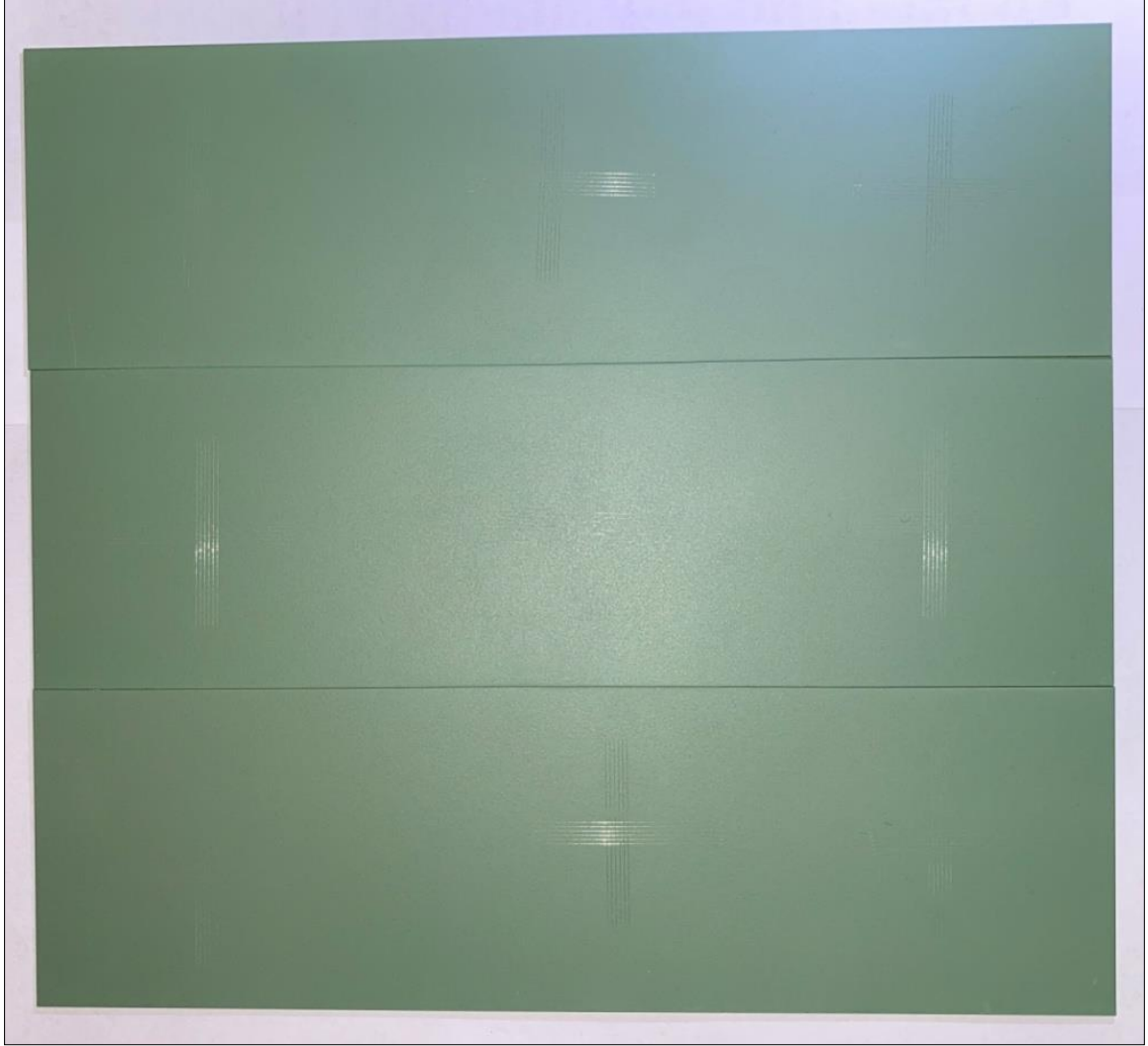
EKLER

EK-1. Korozyon Direnci Test Sonuçları



Resim 1. Silan kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin 168 saat sonraki görüntüleri

EK-2. Boya Yapışma Testi Test Sonuçları



Resim 2. Silan kaplaması yapılmış 2024-T3 panellerin boya yapışma testi görüntüleri



GAZİ GELECEKTİR..