



**ANODİK OKSİDASYONUN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ**

Ufuk AKYILDIZ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 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.

Ufuk AKYILDIZ

18/01/2022

ANODİK OKSİDASYONUN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ufuk AKYILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Alüminyum alaşımlarının, olumsuz çalışma koşullarında daha iyi korozyon direnci sergileyebilmesi için uygulanan anodik oksidasyon işlemi, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve korozyon direncine anodik oksidasyonun etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde AA7050-T7451 ve AA2024-T3 alaşımından hazırlanan numuneler kullanılmıştır. 2-5 µm arasında değişen kaplama kalınlığına sahip kromik asit oksidasyon uygulanmış (CAA) ve anodik oksidasyon uygulanmamış (ASM) AA7050-T7451 numuneler 90 Hz'lik bir frekansta ve R -1 gerilme genliğinde bir dizi eksenel yorulma testine ve ayrıca bir çekme testine tabi tutulmuştur. Test verileri ve Weibull denklemi yardımıyla oluşturulan S-N yorulma grafikleri anodik işlemin alaşımın yorulma performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. ASM ve CAA numuneler karşılaştırıldığında, anodik filmin düşük çevrimli gerilmelerde yorulma mukavemetini etkilemediği ancak 10^3 - 10^7 çevrim döngüleri arasında alaşımın yorulma performansını azalttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, anodik oksidasyon işlemi AA7050-T7451 numunelerin maksimum çekme ve akma dayanımları üzerinde yaklaşık %2,5'lik bir artış sağlamıştır. AA2024-T3 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen tuz püskürtme testlerinde ise, CAA numuneler ASM numunelere kıyasla çok iyi bir korozyon direnci göstermiştir.

Bilim Kodu : 91421

Anahtar Kelimeler : Anodik oksidasyon, Alüminyum alaşımları, Korozyon, Yorulma performansı, Tuz püskürtme testi, AA7050-T7451, AA2024-T3

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Oğuz POYRAZOĞLU

THE EFFECT OF ANODIC COATING ON MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF ALUMINIUM ALLOYS

(M. Sc. Thesis)

Ufuk AKYILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

The anodizing process applied for aluminum alloys to show better corrosion resistance under adverse working conditions affects the mechanical properties of material. In this study, the effects of anodic coating on the mechanical properties and corrosion resistance of aluminium alloys were experimentally investigated. Specimens prepared from AA7050-T7451 and AA2024-T3 alloy were used in the experiments. Chromic acid anodized (CAA) and non-anodized (ASM) specimens with coating thicknesses varying between 2-5 μm were conducted to a series of axial fatigue tests at a stress (R) ratio of -1 and a frequency of 90 Hz and also a series of tensile tests. S-N fatigue curves created with the test datas and Weibull equation showed that the anodic treatment significantly affected the fatigue performance of the alloy. When ASM and CAA samples were compared, it was observed that the anodic coating did not affect the fatigue strength in low cycles, but the fatigue performance of the AA7050-T7451 alloy gradually decreased between 10^3 – 10^7 cycles. In addition, an increase of approximately 2,5 % was observed on the maximum tensile and yield strengths of AA7050-T7451 specimes due to the brittle nature of the anodic coating. In salt spray tests using AA2024-T3 material, CAA samples showed very good corrosion resistance compared to ASM samples.

Science Code : 91421

Key Words : Anodizing, Aluminum alloys, Corrosion, Fatigue performance, Salt spray test, AA7050-T7451, AA2024-T3

Page Number : 81

Supervisor : Assist. Prof. Oğuz POYRAZOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince değerli bilgilerini benimle paylaşan, kıymetli zamanını ayırıp samimiyetini ve bilgi birikimini esirgemedi her zaman elinden gelenin fazlasını sunan, değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuz POYRAZOĞLU ve çalışma arkadaşlarım Mehmet Yasin DEMİREL ve Ali Haydar ÖZCAN'a teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Beni bu günlere ulaştıran ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, hayattaki en büyük şanslarım olan anneme, babama sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. AA2024-T3, AA7075-T6 ve AA7050-T7451 Alaşımlarına Uygulanan Farklı Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Mikroyapı ve Korozyon Direnci Üzerindeki Etkisi	6
2.2. AA2024-T3, AA7075-T6 ve AA7050-T7451 Malzemelerine Uygulanan Farklı Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Yorulma Dayanımı Üzerindeki Etkisi	9
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Alüminyum ve Alaşımları	17
3.1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	18
3.1.2. Alüminyum alaşımlarında temper tanımlama sistemi	19
3.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyonu	23
3.2.1. Korozyon	23
3.2.2. Korozyon mekaniği	24
3.2.3. Korozyon türleri	26
3.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Anodik Oksidasyonu	42

	Sayfa
3.4. Deney Malzemelerinin Karakterizasyonu	50
3.4.1. AA7050-T7451 alaşımının karakterizasyonu	50
3.4.2. AA2024-T3 alaşımının karakterizasyonu	53
3.5. Anodik Oksidasyon İşlemi	55
3.6. Sertlik ve Pürüzlölük Ölçümü	57
3.7. Çekme Testi	57
3.8. Anodik Oksidasyonun Malzemenin Yorulma Performansı Üzerindeki Etkisi	59
3.9. Anodik Oksidasyonun Korozyon Direnci Üzerindeki Etkisi	66
3.10. Cross-Cut Boya Yapışma Testi	68
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİř	78

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dağlama ve anodizasyon tank konsantrasyonu ve işlem parametreleri	9
Çizelge 3.1. Saf alüminyumun genel özellikleri	18
Çizelge 3.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	18
Çizelge 3.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	19
Çizelge 3.4. H temper kodları ve ısıtıl işlem uygulamaları	21
Çizelge 3.5. T temper kodları ve ısıtıl işlem uygulamaları	22
Çizelge 3.6. Standart elektrot potansiyel çizelgesi	37
Çizelge 3.7. AA7050-T451 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları	50
Çizelge 3.8. ASM ve CAA çekme ve yorulma test numunesi sayısı	53
Çizelge 3.9. AA2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları	54
Çizelge 3.10. Tuz püskürtme korozyon ve cruss-cut yapışma testi numune sayısı	54
Çizelge 3.11. Anodik oksidasyon prosesindeki işlem parametreleri.....	56
Çizelge 3.12. AA2024-T3 alaşımı için yüzey pürüzlülük, iletkenlik ve sertlik değerleri ..	57
Çizelge 3.13. AA7050-T7451 alaşımı için yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri.....	57
Çizelge 3.14. Anodik oksidasyonun AA7050-T7451 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi	59
Çizelge 3.15. Yorulma test numunelerine uygulanan gerilmeler ve çevrim sayıları	61
Çizelge 3.16. Tuz püskürtme testi sonuçları	67
Çizelge 3.17. ISO2409'a göre kaplama kalınlığı ve malzeme sertliğine göre kesim parametreleri	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üç numune üzerinden alınan ortalama delik sayısı	8
Şekil 2.2. Üç farklı anodik oksidasyon işlemi uygulanmış AA7050-T7451 numuneler için S-N yorulma testi sonuçları	10
Şekil 2.3. Anodik oksidasyon uygulanmamış ve 10-20 µm oksit kaplama kalınlığına sahip AA7075-T73 test numunelerinin S-N yorulma grafiği	11
Şekil 2.4. Farklı oksit film kalınlığına sahip N_{cor} ve P_{cor} numunelerin yorulma testi sonuçları a) 6 µm kalınlık b) 12 µm kalınlık c) 23 µm kalınlık.....	12
Şekil 2.5. ASM ve farklı kalınlıkta anodik oksidasyon uygulanmış numunelerin S-N yorulma grafikleri	13
Şekil 2.6. Hadde yönüne dik olarak kesilmiş yorulma test numunesi	13
Şekil 2.7. AA7075-T7351test numunesi S-N-P yorulma grafiği a) CAA b) SAA c) BSAA	14
Şekil 2.8. AA2024-T3 test numunesi S-N-P yorulma grafiği a) CAA b) SAA c) BSAA	15
Şekil 3.1. Korozyon mekaniği a) Elektrokimyasal korozyon için mevcut olması gereken koşulları gösteren basitleştirilmiş korozyon hücresi b) Metal yüzeye organik film uygulamasıyla korozyonun önlenmesi	24
Şekil 3.2. Alüminyumda oluşan korozyonun çözünme-çökelme mekanizması	26
Şekil 3.3. Kapalı korozyon hücresi oluşumu	28
Şekil 3.4. Farklı tip ve boyuttaki çukurlaşma korozyonu	29
Şekil 3.5. Taneler arası korozyona uğramış alüminyum alaşımı (büyütme 200X)	29
Şekil 3.6. Taneler arası korozyon a) Aktif bir tane sınır çökeltisinin çözünmesi b) Asil bir tane sınırı çökeltisinin etrafında tükenmiş bir matrisin çözünmesi	30
Şekil 3.7. Çıplak durumda altı yıl deniz suyuna maruz kaldıktan sonra 7075-T6 alaşımında görülen pullanma korozyonu	31
Şekil 3.8. Aralık korozyon mekaniği	33
Şekil 3.9. Alüminyumdaki kabuk altı korozyon hücresinin şematik gösterimi	34

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. Daha asil bir metalle (bakır) temas halindeki alüminyumun galvanik korozyonu (Alüminyum anot ve bakır katod görevi görür)	37
Şekil 3.11. Kesiti alınmış oksit tabakasının şematik gösterimi	43
Şekil 3.12. Anodik oksidasyon işlemindeki tüm proseslerin akış şeması	44
Şekil 3.13. Avrupa Havacılık ve Uzay Endüstrisinde uygulanmakta olan tüm Cr bazlı ön işlem ve anodizasyon adımlarının şematik gösterimi	46
Şekil 3.14. Anodik oksidasyon tankı bağlantı düzeneği	47
Şekil 3.15. Alüminyum/elektrolit arayüzündeki oksit tabakası oluşum mekaniği	48
Şekil 3.16. Farklı seal işlemlerindeki zaman-hidrasyon grafiği	49
Şekil 3.17. pH'ın 25°C'deki Al_2O_3 ve hidratının çözünürlüğü üzerindeki etkisi.....	49
Şekil 3.18. ASM ve CAA uygulanmış AA7050-T7451 test numunelerinin çekme test grafiği	59
Şekil 3.19. AA7050-T7451 ASM ve CAA yorulma test numuneleri için yorulma test verileri	62
Şekil 3.20. S-N yorulma grafikleri a) ASM b) CAA	63
Şekil 3.21. ASM ve CAA test numuneleri S-N yorulma grafikleri	64
Şekil 3.22. ISO2409'a göre boya yapışma değerlendirme tablosu	72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. TFSAA ve CAA uygulanmış yüzeylerin SEM görüntüleri.....	7
Resim 3.1. Genel korozyona uğramış yapısal parça	27
Resim 3.2. Eski uçak motoru krank milinde görülen çukurlaşma korozyonu	28
Resim 3.3. Boeing 757 kanatçık parçasında görülen pullanma korozyonu.....	32
Resim 3.4. Yüzeydeki çizikten kaynaklı oluşan kabuk altı korozyon başlangıcı	33
Resim 3.5. Eşzamanlı olarak meydana gelen birkaç yerel korozyon; çukurlaşma, galvanik korozyon ve erozyon korozyonu	35
Resim 3.6. Aşındırma korozyonu a) Rüzgar türbini dişli kutusunda kullanılan ve zamanından önce bozulan bir konik makaralı rulmandaki eksenel çatlaklar b) Halka deliği üzerinde aşındırıcı korozyon bantları	36
Resim 3.7. Gerilme korozyon çatlamasının makroskobik ve mikroskobik özelliği a) Arızalı bir borunun kesiti ve üzerinde makro dallanma çatlaklarının oluşumu b) IGSCC ve TGSCC ilerlemelerinin optik mikroskop görüntüleri	39
Resim 3.8. Deniz suyuna mazuz kalan bir sütundaki genel ve mikrobiyolojik korozyon	40
Resim 3.9. AA7050-T7451 optik mikroskop görüntüsü a) L-ST düzlemi b) L-LT düzlemi	51
Resim 3.10. Hadde yönü bilinen AA7075-T7451 plaka	51
Resim 3.11. Çekme test numunesi a) Teknik resim b) ASM numune	52
Resim 3.12. Yorulma test numunesi a) Teknik resim b) ASM numune	52
Resim 3.13. Tuz püskürtme ve cross-cut yapışma test numunesi	54
Resim 3.14. Anodik oksidasyon sonrası test numuneleri a) AA2024-T3 korozyon ve cross-cut yapışma testi b) AA7050-T7451 çekme testi c) AA7050-T7451 yorulma testi	55
Resim 3.15. SEM’de ölçülen oksit film tabakasının kalınlığı	56
Resim 3.16. Çekme testi deney düzeneği	58
Resim 3.17. Çekme testi sonrası numune görüntüleri a) Test öncesi b) Test sonrası	58

Resim	Sayfa
Resim 3.18. Rezonans test cihazı deney düzeneği	60
Resim 3.19. Yorulma test numunesi a) Deney öncesi b) Deney sonrası	61
Resim 3.20. Dijital mikroskop görüntüleri a) ASM, 130 MPa b) CAA, 120 MPa	64
Resim 3.21. Oksit film tabakasında görülen çatlak ve çukurlaşma kusurları	65
Resim 3.22. CAA yorulma test numunesi dijital mikroskop görüntü a) 120 MPa b) 360 MPa c) 400 MPa	66
Resim 3.23. Deney düzeneği a) Numune sabitleyici aparat b) Tuz püskürtme test kabini.....	67
Resim 3.24. Tuz püskürtme testi sonrası deney numuneleri a) ASM b) CAA c) CAA + Seal	68
Resim 3.25. Stronsiyum kromat epoksi astar kaplı test numunesi örneği	69
Resim 3.26. Deney düzeneği a) NeoTec Tam Otomatik Cross Cut ve Çizilme Test Cihazı b) Cross Cut ve Çizilme Test Cihazı kesici ucu	69
Resim 3.27. Rulo yardımıyla kafes desenine tam teması sağlanan 3M bant	70
Resim 3.28. Cross-cut yapışma test numunesi üzerinde oluşturulan kafes deseni	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
g	Gram
Hz	Hertz
lt	Litre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
MPa	Megapascal
V	Volt
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

Açıklamalar

a	Weibull denklemi değişkeni
AA	Aluminum Assosiation
ASM	Anodizasyon uygulanmamış numune
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Weibull denklemi değişkeni
B	Weibull denklemi değişkeni
BSAA	Borik-sülfürik asit anodizasyon
CAA	Kromik asit anodizasyon
CSA	Kromik-sülfürik asit dağlama
C_t	Anodik film kalınlığı
HSAA	Sert sülfürik asit anodizasyon
IACS	International Annealed Copper Standard
IGC	Taneler arası korozyon
L	0° hadde yönü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

LT	90° hadde yönü
MIC	Mikrobiyolojik korozyon
N	Uygulanan gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı
N_{cor}	Korozyona uğramamış numune
PAA	Fosforik asit anodizasyon
P_{cor}	Korozyona uğramış numune
SAA	Sülfirik asit anodizasyon
S	Uygulanan gerilme
SCC	Gerilmeli korozyon çatlağı
S_e	Yorulma sınır değeri
TSAA	Tartarik-sülfirik asit anodizasyon

1. GİRİŞ

Doğada oksit ve silikat bileşikler halinde bulunan alüminyum, düşük özgül ağırlığı, yüksek mekanik özellikleri ve üstün korozyon direnci sayesinde havacılıktan gıda endüstrisine kadar birçok farklı alanda kullanımı tercih edilmektedir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı güçlü ve hafif yapıların ön plana çıktığı hava araçlarının imalatına olanak sağlarken, ince folyo şeklinde üretilabilir olması ve kolay şekillenebilirliği ideal bir ambalaj malzemesi olarak alüminyumun kullanımını arttırmaktadır.

Alüminyum içerdiği alaşım elementi ve oranına bağlı olarak farklı özelliklere sahip alaşım sınıflarına ayrılmaktadır. Havacılık sektöründeki isteklere bağlı olarak, özellikleri büyük ölçüde artırılmış 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar geliştirilmiştir. Temel alaşım elementi bakır olan 2xxx serisi, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sürünme direnci sergilemesine rağmen, iyi bir korozyon direncine sahip değildir. Benzer şekilde ana alaşım elementi çinko olan 7xxx serisi, yüksek mukavemet göstermesine rağmen korozyon çatlağına karşı hassas olabilmektedir. AA2024-T3 ve AA7050-T7451 alaşımları havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum alaşımları üstün korozyon direnci sayesinde atmosfere maruz kaldığında, metal yüzeyinin daha fazla oksidasyona uğramasını engelleyen ince bir oksit tabakası oluşturarak koruma sağlamaktadır. Alüminyum yüzeyindeki koruyucu bu tabaka çalışma koşullarına bağlı olarak uzun süre aşındırıcı bir maddeye veya ortama maruz kaldığında metal yüzeyi korozyona uğramaya başlayacak ve önlem alınmaması durumunda korozyon ilerleyerek ciddi hasarlara sebep olabilmektedir.

Özellikle havacılık endüstrisinin en büyük endişelerinden biri olan korozyon ve etkileri arka planda bırakılırsa, korozyon kaynaklı oluşacak hasarlar ciddi maliyetlere sebep olabilmektedir. Bu hasarlar genellikle korozyon bakımının yeterince yapılmaması, korozyon sürecinin anlaşılmaması ve uçak yapısal elemanlarında korozyonun çekirdeklenme ve büyüme davranışının tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşım, hem yapısal hem de yapısal olmayan bileşenlerde kapsamlı korozyona yol açarak bakım maliyetini önemli ölçüde artırmıştır. Korozyona karşı alınan bu önlemler ortaya büyük bir harcama çıkartmıştır. ABD'deki toplam yıllık korozyon maliyetleri trilyon dolarlar olduğu

tahmin edilmektedir. Bu tahminler, NACE Korozyon Maliyetleri Çalışmasında bildirildiği üzere, 1998'de tahmini korozyon maliyetlerinin 276 milyar dolar olduğunu belirten, NACE tarafından yapılan çalışmaya dayanmaktadır [1].

Hava aracı parçalarına büyük çaplı hasar verebilen korozyonun kontrol altına alınması, havacılık sektöründe oldukça önemli bir durumdur. Yapılan araştırmalar korozyonun yaygınlığı ve biçimsel çeşitliliğine rağmen kontrol edilebilir olduğunu göstermektedir. Korozyonun önlemek için korozyona dayanıklı malzemelerin seçimi, korozyonu hafifletecek tasarım değişiklikleri, organik kaplamalar, anodik oksidasyon (anodizasyon), korozyon kontrol programları ve korozyon tahmin modelleri gibi hava araçlarında korozyon kaynaklı hasarların tespiti konusunda artan farkındalıkla birlikte, mevcut tasarımın ömrü ve yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan ve maliyeti önemli ölçüde artırmadan korozyona karşı koruma sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı; havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere farklı sektörlerde alüminyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmak için sıklıkla kullanılan anodik oksidasyon işleminin malzemenin mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında; AA2024-T3 sac ve AA7050-T7451 plaka malzeme kullanılarak hazırlanan test numuneleri yağdan arındırma, alkali temizleme, alkali dağlama ve asidik temizleme ön yüzey işlemlerinden geçtikten sonra kromik asit anodizasyon (CAA) işlemine tabi tutulmuştur. Anodik oksidasyon işleminin AA7050-T7451 alaşımının mekanik özelliklerine etkisini incelemek üzere hazırlanan anodize edilmiş (CAA) ve anodize edilmemiş (ASM) numuneler bir dizi çekme ve yorulma testine tabi tutulmuştur. Bununla birlikte, anodik oksidasyon işleminin korozyon direnci üzerindeki etkisini incelemek üzere AA2024-T3 numuneler 336 saatlik tuz püskürtme testi uygulanmıştır. Deney numunelerinin mikroyapısı ayrıca SEM ve optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Korozyon, malzemenin veya malzemelerin çevresi ile etkileşimi sonucu özelliklerinin bozulması olarak tanımlanmaktadır. Metal yapılara büyük hasarlar verebilen korozyonun kontrol altına alınması oldukça önemlidir. Yüzeyde olduğu gibi içyapıda da meydana gelebilen korozyonun fiziksel etkileri; bölgesel çukurcuk oluşumu, yüzey geneline yayılan bozukluklar, gerilmeli korozyon çatlağından kaynaklı taneler arası veya tane içinde meydana gelen çatlaklar, galvanik korozyon ve pullanma korozyonunun neden olduğu büyük bozukluklar şekilde sınıflandırılabilir. Korozyon fiziksel bozukluklara neden olmasının yanında ayrıca yorulma dayanımını düşürücü ve aşındırıcı bir etkisi olduğu da bilinmektedir.

Metal malzemelerin korozyonu önlemek ve kontrol altına almak için çeşitli yöntemler tercih edilmektedir. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan elektrokaplama ve anodik oksidasyon işlemleri ile galvanik korozyonu önlemek için uygulanan katodik ve anodik koruma sistem uygulamalarıdır. Ayrıca, çalışma koşullarına bağlı olarak uygun malzeme seçimi yapılarak, tasarım aşamasında korozyona neden olan etkenlerin azaltılması ve ortamda korozyona neden olan özelliklerin kısmen ve ya tamamen giderilmesi ile sağlanabilmektedir.

Katodik koruma, korunacak metal yüzeyini (ana metal) elektrokimyasal hücrede katot haline getirerek korozyonunu kontrol etmek için kullanılan elektrokimyasal bir işlemdir. Katodik koruma sisteminin ana prensibi elektrokimyasal korozyon teorisine dayanmaktadır. Bu yöntem, korunacak metal malzemeyi daha kolay korozyona uğrayan bir metale (ikinci metal) birleştirerek çalışmaktadır. Bu sayede ikinci metal daha sonra katot görevi gören ana metal yerine korozyona uğrayarak ana metali korumaktadır. Katodik koruma sistemde, ana metal yüzeyindeki anodik bölgeler katot haline dönüştürülerek korozyon olayı kesin şekilde önlenmektedir. Bazı durumlarda, katodik korumanın etkinliğini artırabilen elektrokimyasal işleme ek elektronlar sağlamak için harici güç kaynakları kullanılmaktadır.

Anodik koruma, ana metal yüzeyini elektrokimyasal hücrede anot haline getirerek koruyabildiğimiz diğer bir elektrokimyasal işlemdir. Ancak anodik korumanın elektrokimyasal prensibi katodik korumaya göre farklılık göstermektedir. Anodik koruma elektrokimyasal açıdan bir pasifleştirme işlemi olduğundan sadece pasifleştirme özelliği olan

metallere uygulanabilmektedir. Bu yöntem sadece oldukça geniş pasif bölgeler gösteren malzeme-ortam kombinasyonları için kullanılabilmektedir. Bu sayede metal sürekli olarak pasif bölgede tutularak korozyona karşı koruma sağlanmaktadır. Ancak bu sistemde korozyon tam olarak durdurulmayıp, korozyon hızı pratikte önemsiz sayılacak ölçüde azaltılmaktadır. Anodik korumada da aynen katodik korumada olduğu gibi, ana metale dıştan bir akım uygulanmaktadır.

Elektrokaplama ve anodik oksidasyon (anodizasyon) işlemleri ise korozyonu önlemek için uygulanan yüzey işlemleridir. Bu koruma yöntemleri, çevresel koşullara bağlı olarak metal yüzeyinde ortaya çıkan ve doğal olarak tahrip edici olan korozyonu önlemek için kullanılan iki elektrolitik işlemdir. Elektrolitik bir işlemde, anot ve katot olarak iki elektrotlu bir elektrolitik hücre kullanılmaktadır. Bu iki yüzey koruma işleminde, korunacak metal yüzeyi (alt tabaka) anot veya katot olarak kullanılmaktadır. Her iki metod da elektrolitik işlemler olduğundan dolayı birbirleriyle karıştırılmamalıdır.

Elektrokaplama işleminde, korunacak olan malzeme oluşturulacak bir elektrolitik hücrenin katodu haline getirilerek, elektrolitik çözeltideki metal iyonlarını malzeme yüzeyine biriktiren elektrolitik bir işlemdir. Çözelti olarak asit, baz veya tuzlu su kullanılmaktadır. Anotta bulunan malzeme genellikle kaplamayı oluşturacak metalden seçilmekte ve böylece kaplama metal kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, ana malzemeye (katot görevi görür) ikinci metalin (anot görevi görür) iyonlarının yapışması ile korozyona karşı koruma sağlayan kaplama büyüterek oluşmaktadır.

Anodik oksidasyon, korozyona karşı alüminyum alaşımlarının korunmasında kullanılan en etkili yöntemlerden biridir ve malzeme yüzeyinde kararlı bir oksit takası oluşturan elektrolitik bir işlemdir. Bu işlem eloksal, anotlama ya da anodizasyon olarak da adlandırılmaktadır. Anodik oksidasyon işleminde, elektrolitik çözeltisi ve işlem parametrelerine bağlı olarak farklı yapıda oksit tabakası elde edilebilmektedir. Ayrıca, yüksek elektrolit sıcaklığı ve düşük akım yoğunluklarında nispeten daha ince ve daha gözenekli (poröz) bir oksit yapısı oluşurken, düşük elektrolit sıcaklığı ve yüksek akım yoğunluklarında sert ve yoğun bir oksit yapısı oluşmaktadır. En yaygın türleri kromik asit anodizasyon (CAA), sülfürik asit anodizasyon (SAA), fosforik asit anodizasyon (PAA), borik-sülfürik asit anodizasyon (BSAA) ve tatarik-sülfürik asit anodizasyon (TSAA) işlemleridir. Oksit film kalınlığı genellikle 0,0025 ve 0,020 mm arasında değişkenlik

göstermektedir. Daha kalın anodik film ise sert sülfürik asit anodizasyon (HSAA) ile elde edilebilmektedir.

Elektrokaplama ve anodik oksidasyon yöntemleri arasındaki fark önemlidir. Anodik oksidasyonda, ana metal yüzeyi elektrolitik hücrede anot yaparak koruyabildiğimiz bir elektrolitik işlem türüdür, katodik koruma ise metal bir yüzeyi elektrolitik hücrede katot yaparak koruyabildiğimiz bir tür elektrolitik işlemdir. Bu iki işlem arasındaki en temel fark, anodik oksidasyonda korunacak yüzeyin anot görevi görmesi, elektrokaplamada ise katot görevi görmesidir. Bununla birlikte, anodik oksidasyonda ana metal yüzeyi, alt tabaka metalin kimyasal reaksiyonu sonucu kararlı bir oksit takasına dönüşmektedir. Elektrokaplamada ise ana metalin yüzeyine ikinci metalin iyonlarının yapışması ile metal yüzeyinde büyüyerek oluşmaktadır. Bu nedenle, anodik oksidasyon bir kaplama tekniği olmayıp sadece bir elektrokimyasal dönüşüm işlemidir.

Havacılık sektörünün önemli girdilerinden birini oluşturan alüminyum ve alüminyum alaşımları düşük yoğunluğu, ancak alaşımlama ve ısıl işlemlerle elde edilebilen yüksek spesifik mekanik özellikleri ve korozyon direnci başta olmak üzere birçok avantaj sunmaktadır. Özellikle saf alüminyum, yüksek ve düşük pH ortamları dışında nispeten yüksek korozyon direncine sahiptir ve çoğu metalden daha az korumaya ihtiyaç duymaktadır. Havacılık uygulamaları için en yaygın olarak kullanılan alaşımlar, ana alaşım elementi olarak bakır içeren 2xxx serisi ve ana alaşım elementleri olarak çinko, magnezyum ve bakır içeren 7xxx serileridir.

2xxx serisinin bir üyesi olan 2024 alaşımı, yüksek sıcaklıklarda mükemmel mukavemet sergilemesinin yanında yüksek sıcaklıklarda ki sürünme direncinden dolayı havacılık uygulamalarında kullanılan önemli bir alaşımdır. Bu alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik işlemler arasında çökelme sertleştirme ısıl işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Bu işlem, alaşımındaki bakır elementinin Al_2Cu çökeltileri oluşturarak mukavemeti arttırmasına rağmen korozyon direncini düşürmektedir. Bu alaşımın ayrıca farklı kondisyondaki tepeleri mevcuttur. Özellikle T3 temperi yüksek toklukları ile bilinmektedir.

Temel alaşım elementi çinko olan 7xxx serisi çeşitli ürün formlarında mevcuttur ve çökelme sertleştirme ile güçlendirilerek yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları elde

edilebilmektedir. 7050 alaşıımı yüksek mukavemet, SCC'ye karşı yüksek direnç ve iyi kırılma tokluğuna sahiptir. Bu alaşıımının, güç-tokluk-korozyon direnci bakımından çok çeşitli ürün formları ve temperleri bulunmaktadır. Bunlar arasında 7050-T7451 temperi, yüksek mukavemet göstermesinin yanında iyi bir tokluk ve korozyon direncine de sahiptir. Benze şekilde 7075, uçak ve uzay uygulamaları için geliştirilmiş yüksek mukavemetli bir diğer alüminyum alaşıımıdır ve iyi işlenebilirliğinin yanında yüksek bir korozyon direnci de göstermektedir. Özellikle 7075-T6 temperi çoğu yumuşak çelikten daha güçlüdür.

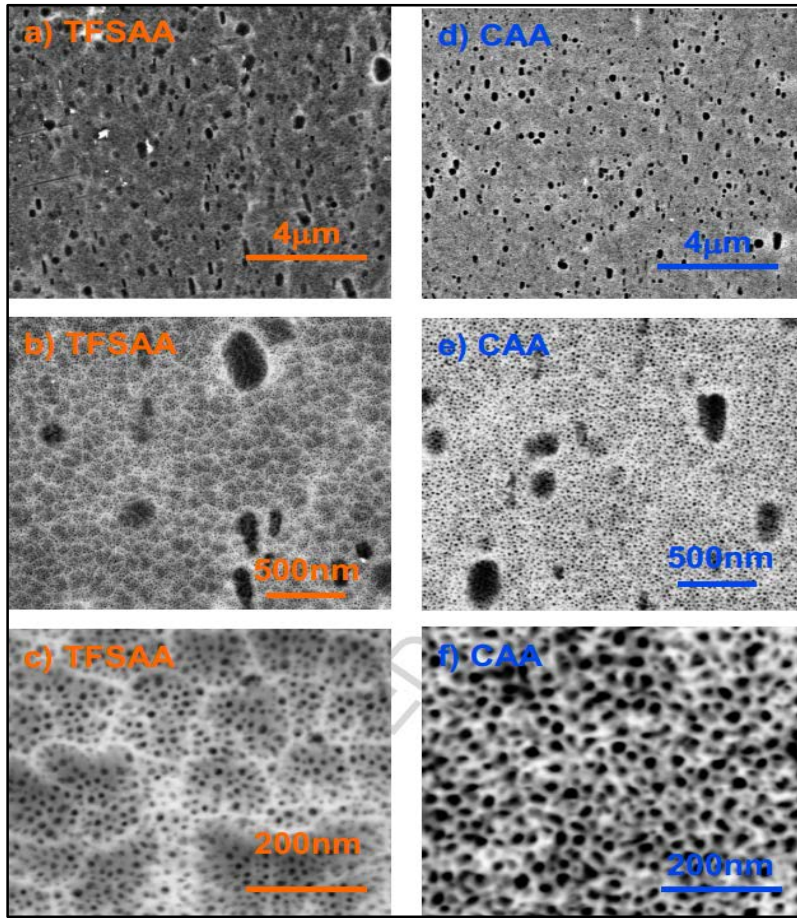
Bu alüminyum alaşıımları yüksek korozyon direncine sahip olmasına rağmen korozif bir maddeye veya ortama uzun süreli maruz kalması sonucunda korozyona uğramaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşıımlarının yüzeyinde kararlı bir oksit tabakası oluşturmak için anodik oksidasyon işlemi uygulanarak korozyona karşı etkili bir koruma sağlanmaktadır. Bu işlemde, proses parametrelere bağlı olarak farklı yapıdaki oksit tabakaları elde edilmektedir.

Literatür taramasında, kromik asit, tartarik asit, fosforik asit, sülfürik asit veya bunların karışımı olan bir elektrolit çözeltisi ve diğer proses parametlerine (sıcaklık, gerilme ve anodik oksidasyon süresi) bağlı olarak AA2024-T3, AA7075-T6 ve AA7050-T7451 alaşıımlarında oluşturulan farklı yapıdaki oksit tabakaların mikroyapısı, korozyon direnci ve anodik oksidasyon işleminin malzeme yorulma dayanımına etkisi iki ana başlık altında incelenmiştir. Ayrıca bazı anodik oksidasyon türlerinin çevreye ve insan sağlığına zarar vermesinden kaynaklı, bu kaplamaların yerine kullanılabilecek yeni anodik oksidasyon işlemleri üzerinde de çalışmaların olduğu gözlenmiştir [2-10].

2.1. AA2024-T3, AA7075-T6 ve AA7050-T7451 Alaşıımlarına Uygulanan Farklı Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Mikroyapı ve Korozyon Direnci Üzerindeki Etkisi

Ding, Smith, Hebert, Zhang ve Jaworowski (2018) CAA'nın alternatifi olabilecek tartarik-fosforik-sülfürik asit anodizasyon (TFSAA) üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Q-lab Corporation'dan alınan AA2024-T3 test panellerinin bir kısmı CAA işlemi için $34 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 41,6-57,2 g/lit kromik asit çözeltisinde kontrollü sabit bir rampa hızı ile 15 dakika içinde yavaşça 40 V'a çıkarıldıktan sonra burada yaklaşık 35-45 dakika bekletilerek anodik oksidasyon uygulanmıştır. Diğer test panelleri ise $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ağırlıkça %10 sülfürik asit solüsyonu içinde 5 V/dak'lık bir artışla 3 dakika içerisinde 15 V'a çıkarıldıktan sonra 5-20 dakikalık süre boyunca 15 V'luk sabit voltaj altında TFSAA işlemi uygulanmıştır.

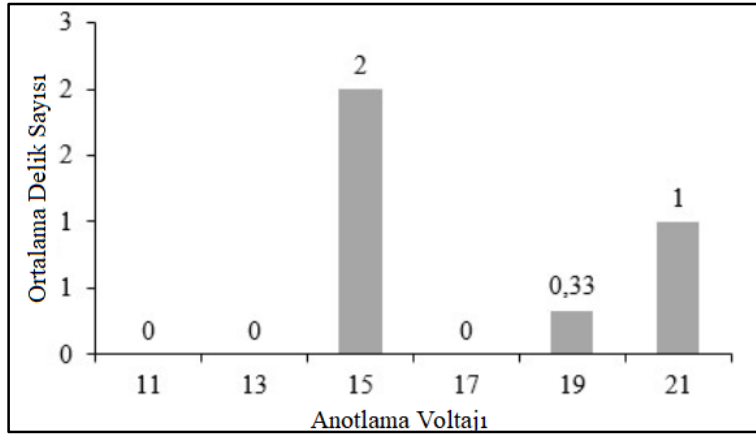
Yapılan çalışma sonucu, kromik asit ile oluşturulan anodik filmin, benzer kalınlığa sahip TFSAA göre daha büyük gözeneklere, daha düşük ağırlığa ve yoğunluğa sahip olduğunu göstermektedir. Resim 2.1’de CAA ve TFSAA ile elde edilen film morfolojisi gösterilmektedir. Seal uygulanmış anodik kaplamaların korozyon dirençleri karşılaştırıldığında; nikel asetat seal uygulanmış CAA numuneler, dikromat seal uygulanmış CAA numunelere göre çok daha iyi bir performans göstermiştir. Bununla birlikte, en iyi korozyon direnci iki aşamalı seal uygulanmış TFSAA işleminde gözlemlenmiştir [2].



Resim 2.1. TFSAA ve CAA uygulanmış yüzeylerin SEM görüntüleri [2]

Setianto ve Korda (2019) yaptıkları çalışmada, TSAA ve CAA uygulanan AA2024-T3 alaşımından hazırlanan numunelerinin kaplama ağırlığı, korozyon direnci ve kaplama kalınlığı üzerine anodik oksidasyon potansiyelinin etkisini incelemişlerdir. Numunelerin bir kısmı, 46 g/lt kromik asit banyosunda 40°C sıcaklıkta ve 40 V eloksal potansiyeli altında 40 dakika bekletilerek anodize edilmiştir. Diğer numunelere ise 87 g/lt tartarik asit ve 44 g/lt sülfürik asit karışımı içeren çözelti içinde 37 °C'de 11, 13, 15, 17, 19 ve 21 V potansiyel

varyasyonlar ile 20 dakika banyoda bekletilerek tartarik-sülfürik asit anodizasyon uygulanmıştır. Korozyon direnci testi için numunelere 96 saatlik tuz püskürtme testi uygulanırken, kaplama ağırlığı gravimetrik ve kaplama kalınlığı metalografik yöntemle incelemiştir. Tuz püskürtme testi, anodik oksidasyon potansiyeli ile korozyon direnci arasında bir ilişki olmadığını göstermektedir. CAA kaplı numunelerde ve 11, 13 ve 17 V'luk anodik oksidasyon potansiyeline sahip TSAA kaplı numunelerde çukurlaşma korozyonu görülmezken, 15, 19 ve 21 V'luk anodik oksidasyon potansiyeline sahip TSAA numunelerde çukurlaşma korozyonu gözlemlenmiştir. Çukurlaşma ile anodik oksidasyon potansiyeli arasındaki ilişki Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Kaplama ağırlığı ve kalınlığının eloksal potansiyeliyle orantılı olarak arttığı ayrıca belirtilmiştir [3].



Şekil 2.1. Üç numune üzerinden alınan ortalama delik sayısı [3]

Zhang, Zhao, Zuo, & Xiong (2008) çalışmalarında, CAA, PAA, BSAA ve fosforik asit ile kombine edilmiş borik-sülfürik asit anodizasyon (FBSAA) işlemleri ile oluşturulan oksit tabakaların yapışma mukavemeti ve korozyon direncini gözlemlemek için bir dizi test uygulamışlardır. Anodik oksit tabakanın mikroyapısı ve topografyası SEM ve AFM'de ayrıca incelenmiştir. Bu çalışmada, 20×100×2 mm ve 25.4×152.4×2 mm boyutunda hazırlanan AA2024-T3 numuneler ve SY-40 epoksi reçinesi yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Numuneler Çizelge 2.1'de verilen banyo konsantrasyonları ve işlem parametrelerine uygun olarak CAA için dikromat/sülfürik asit dağlama ve diğer anodizasyon işlemleri için sülfat/sülfürik asit dağlama ön işlemlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler ve incelemelerde, FBSAA ile elde edilen oksit filmlerin yüksek gözenekliliğe ve büyük gözeneklere sahip olmasının yanında, nemli ve sıcak ortamlarda BSAA ve PAA göre daha iyi bir korozyon direnci ve daha yüksek yapışma mukavemeti göstermektedir [4].

Çizelge 2.1. Dağlama ve anodizasyon tank konsantrasyonu ve işlem parametreleri [4]

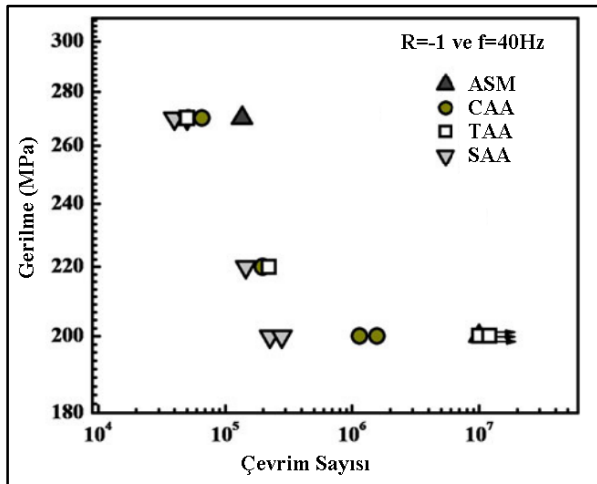
Süreç	Bileşenler	Konsantrasyon	Uygulama Şartları
Dikromat-sülfürik Asit Dağlama	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ H_2SO_4	33 g/lt 330 g/lt	68°C de, 10 dakika
Sülfat-sülfürik Asit Dağlama	H_2SO_4 Fe_2SO_4	370 g/lt 150 g/lt	65°C de, 10 dakika
Kromik Asit Anodizasyon	Cr_2O_3	50 g/lt	40±2°C de, 0-40V arası artan voltajda 10 dakika, sabit 40V da 20 dakika
Fosforik Asit Anodizasyon	H_3PO_3	10 wt %	20°C de, 20V sabit voltajda, 20 dakika
Borik-sülfürik Asit Anodizasyon	H_2SO_4 H_3BO_3	5 wt % 0.8 wt %	26°C de, 15±1V sabit voltajda, 20 dakika
Fosforik-borik-sülfürik Asit Anodizasyon	H_2SO_4 H_3BO_3 H_3PO_3	5 wt % 0.8 wt % 50 g/lt	22°C de, 18±V sabit voltajda, 20 dakika

Thompson ve diğerleri çalışmalarında, SAA ve BSAA işlemleriyle elde edilen anodik oksit kaplamanın mikroyapısı ve korozyon direncini incelemişlerdir. AA2024-T3 ve AA7075-T6 malzemesi kullanılarak hazırlanan 30 mm x 10 mm boyutlarındaki test numunelerine kaplama öncesi elektro-parlatma, kromik-sülfürik asit (CSA) dağlama veya alkali temizle ön işlemleri uygulanmıştır. Ardından deiyonize suda durulanan ve soğuk hava akımında kurutulan numuneler, 300 K'de sülfürik asit ve borik-sülfürik asit çözeltileri içinde 15 V'luk sabit bir gerilimle anotlanmıştır. Yapılan testler sonrası, BSAA kaplamanın morfolojisi, film kalınlaşma oranı, kaplama ağırlığı ve tuz püskürtme testindeki korozyon direncinin SAA ile yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir [5].

2.2. AA2024-T3, AA7075-T6 ve AA7050-T7451 Malzemelerine Uygulanan Farklı Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Yorulma Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Lee, Jeong, ve Kim (2012) çalışmalarında CAA, TAA ve SAA işlemlerinin 7050-T7451 alaşımının yorulma performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Hadde

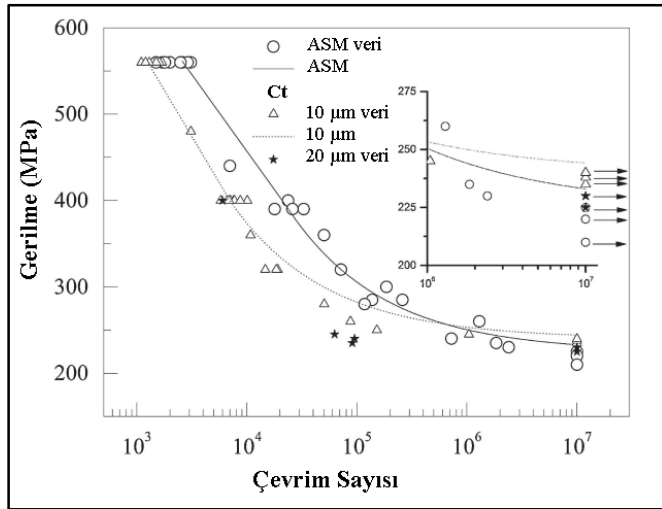
yönünde paralel olarak işlenmiş anotlanmamış (ASM) ve farklı anotlama işlemi uygulanmış numunelerin yorulma testleri 0.1'lik bir R gerilme oranı ve 200, 220 ve 270 MPa'lık üç farklı gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir. S-N yorulma grafiklerini karşılaştırıldığında, 7050-T7451 numunelerde anodik oksidasyonun yorulma dayanımını azalttığı ve TAA'nın düşük gerilmelerde CAA ve SAA'ya göre daha fazla dirençli olduğu Şekil 2.2'de görülmektedir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde de anodik kaplamalardaki morfoloji farklılık göstermektedir. CAA numunelerinin oksit tabakasında pürüzlü ve düzensiz gözeneklere ve TAA numunesi için nispeten pürüzsüz ve yuvarlak gözeneklerin olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte anotlama sonrası yorulma direncindeki düşüş, oksit tabaka altındaki çukurların düzensiz doğasının ve üstteki oksit tabakadaki mikro çatlakların bir sonucu olduğu değerlendirilmektedir [6].



Şekil 2.2. Üç farklı anodik oksidasyon işlemi uygulanmış AA7050-T7451 numuneler için S-N yorulma testi sonuçları [6]

Shih, Lee, ve Jhou (2014) çalışmalarında, anodik oksidasyonun AA7075-T73 alaşımının korozyon direnci, yorulma dayanımı ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çekme testi için ASTM B557 göre 6 mm'lik çapa sahip numuneler kullanılırken, burma gerilmeli yorulma testi için JIS Z2274 spesifikasyonuna göre 8 mm'lik çapa sahip test numuneleri kullanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde ise elektron mikroskobu kullanılmıştır. Anodik kaplama için 0,1 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip test numuneleri yağ ve kirden arındırıldıktan sonra 15 mA/cm² akım yoğunluğu ve 15°C sıcaklıkta ağırlıkça % 15 sülfürik asit solüsyonunda anotlanmıştır. Ardından numuneler seal işlemi için 95°C sıcaklıktaki suda 1200 saniye boyunca bekletilmiştir.

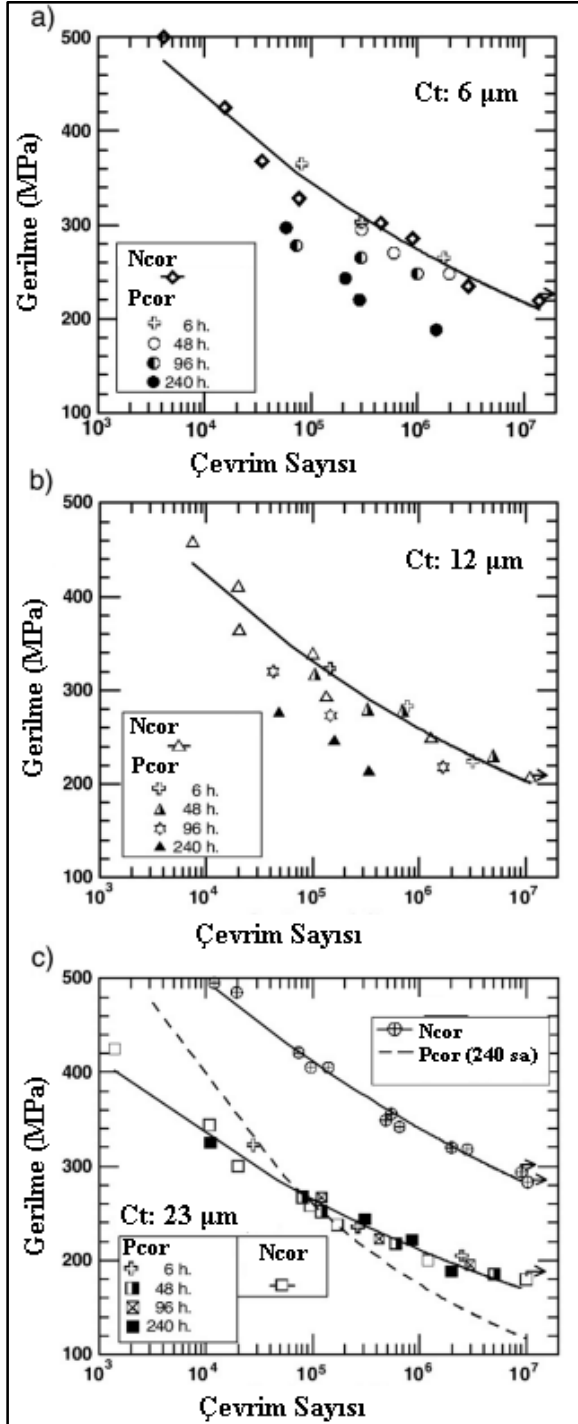
Yapılan deneylerde seal işlemi uygulanmış SAA kaplı numunelerin korozyon direncinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 40 Hz frekansta ve 100 N*m momentumla gerçekleştirilen yorulma testlerinde; yüzey işlem uygulanmamış numunelerin 10^7 çevrim döngüsündeki gerilme genliği 225 MPa iken, SAA film kalınlığı 10 ve 20 μm olan numuneler için bu değer sırasıyla 240 ve 230 MPa olarak Şekil 2.3'teki S-N yorulma grafini elde etmişlerdir. Bu grafikte 10^3 – 10^5 arasındaki çevrim değerlerinde anodizasyonun yorulma dayanımı üzerinde bir azalmaya yol açtığı açık bir şekilde görülmektedir [7].



Şekil 2.3. Anodik oksidasyon uygulanmamış ve 10-20 μm oksit kaplama kalınlığına sahip AA7075-T73 test numunelerinin S-N yorulma grafığı [7]

Cirik ve Genel (2008) yaptıkları çalışmada, AA7075-T6 numuneler üzerinde anodik kaplamanın yorulma direncine etkisinin yanında sülfürik asit ile anotlanmış farklı kalınlıklara sahip numuneler üzerinde korozyonun yorulma performansına etkisini incelemişlerdir. Testler, burma gerilmeli yorulma testi cihazı yardımıyla 95 Hz'lik bir frekansta gerçekleştirilmiştir. 6, 12 ve 23 μm 'luk farklı oksit kaplama kalınlıklarına sahip test numuneleri sırasıyla 6, 48, 96 ve 240 saat süreyle ağırlıkça % 3,5 NaCl (400 ml'de) çözeltisine maruz bırakılmıştır. ASM ve anodik oksidasyon uygulanmış numuneler için ortalama yüzey pürüzlülüğü sırasıyla (R_a) 0,4–0,5 ve 1,6–1,9 μm aralığında değişmektedir. Test sonuçları, korozyonun yorulma dayanımı üzerinde azalmaya neden olduğu ve bunun kaplama kalınlığıyla orantılı olarak arttığı belirtilmiştir. Oksidasyonun çukurlaşmayı azalttığı ve artan oksit film kalınlığıyla daha iyi korozyon direnci sergilediği ayrıca gözlemlenmiştir. Anodik oksidasyon sonrası korozyona uğramış (P_{cor}) ve uğramamış (N_{cor}) numuneler ile yapılan yorulma testleri, en kalın oksit tabakasına sahip numuneler dışında

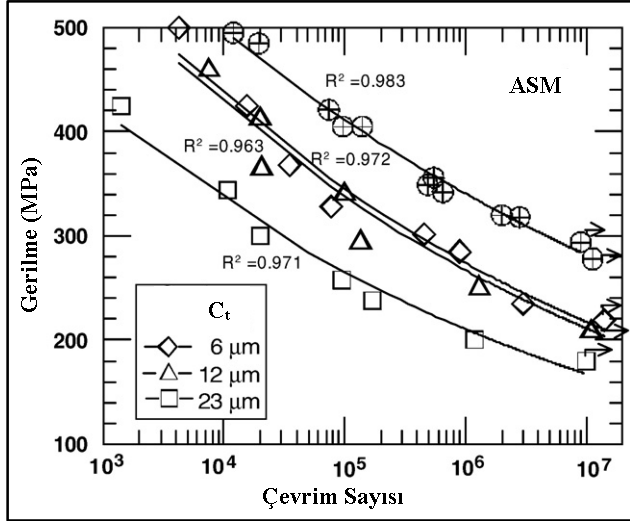
haricinde diğer numunelerin korozyondan önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Yapılan testler sonrası elde edilen S-N yorulma grafikleri Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Farklı oksit film kalınlığına sahip N_{cor} ve P_{cor} numunelerin yorulma testi sonuçları
a) 6 µm kalınlık b) 12 µm kalınlık c) 23 µm kalınlık [8]

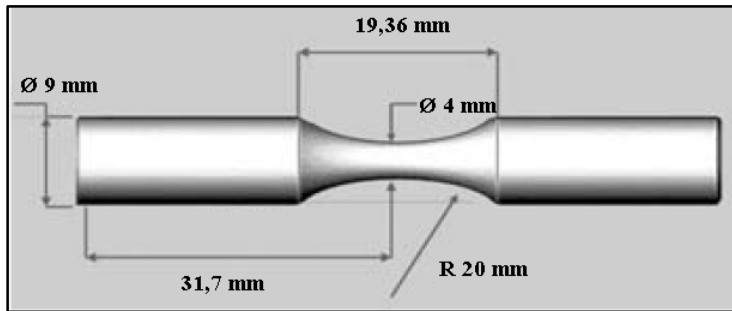
Diğer taraftan, oksit filmin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi karşılaştırıldığında, ASM

numuneler yalnızca yüksek çevrimlerde yorulma performansını iyileştirirken, düşük çevrimlerde yorulma performansını azalttığı Şekil 2.5’de verilen S-N yorulma grafiğinde gösterilmektedir. Özellikle 23 μm kalınlıkta yaklaşık %40’lık bir azalma oluşmuştur [8].



Şekil 2.5. ASM ve farklı kalınlıkta anodik oksidasyon uygulanmış numunelerin S-N yorulma grafikleri [8]

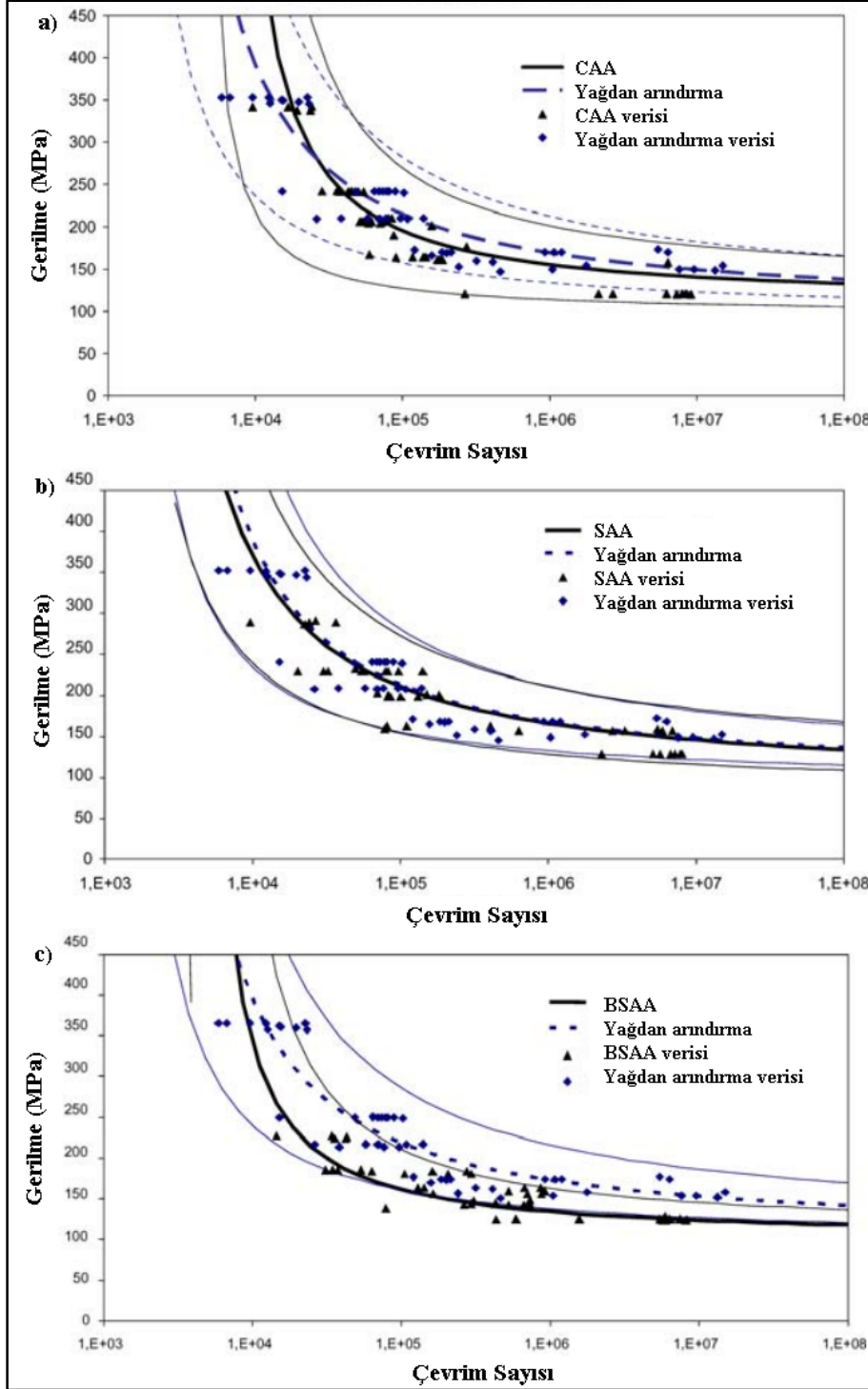
Monsalve ve diğerleri (2007) araştırmalarında, CAA, SAA ve BSAA işlemlerinin AA2024-T3 ve AA7075-T7351 alaşımlarının yorulma direnci üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Yorulma direncinin önemli olduğu yüzeylerde daha fazla gerilme açığa çıktığı için yorulma grafiklerinin oluşturulmasında Maennig'in yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2.6’da gösterilen test numunelerine sırasıyla CAA, SAA ve BSAA işlemleri uygulanmıştır. Deneyler, oda sıcaklığında 100 Hz frekans ve R -1 gerilme genliği altında burma gerilmeli yorulma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



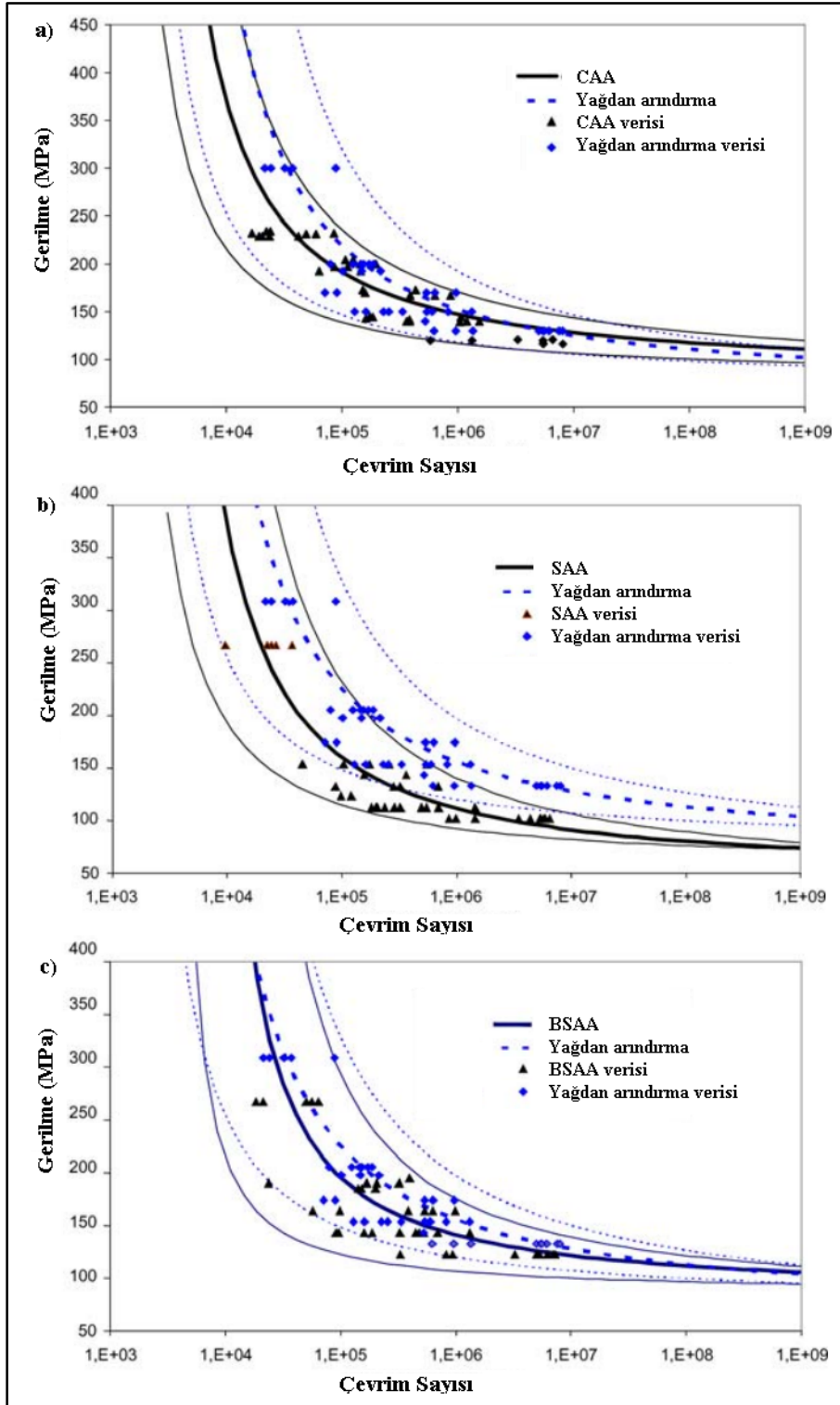
Şekil 2.6. Hadde yönüne dik olarak kesilmiş yorulma test numunesi [9]

İncelenen sonuçlar, Maennig'in yönteminin yorulma ömrünü incelemeye elverişli bir

yöntem olduğu ve anodik oksidasyonun her iki alaşımın yorulma ömründe bir azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de her iki alaşım için yorulma grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerdeki değişim her bir numuneye uygulanan anodik kaplamada oluşan yüzey hasarları ile ilişkilendirilmiştir [9].



Şekil 2.7. AA7075-T7351 test numunesi S-N-P yorulma grafiği a) CAA b) SAA c) BSAA [9]



Şekil 2.8. AA2024-T3 test numunesi S-N-P yorulma grafiği a) CAA b) SAA c) BSAA [9]

Bu tez çalışmasında, havacılık endüstrilerinde sıklıkla kullanılan, AA2024-T3 ve AA7050-T7451 alaşımlarının mekanik özellikleri ve korozyon direncine kromik asit anodizasyon (CAA) işleminin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Literatür araştırmalarında,

alüminyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmak amacıyla farklı türde anodik oksidasyon işlemleri uygulanmaktadır. Uygulanan bu işlem zorlu çalışma koşullarına bağlı olarak korozyona karşı koruma sağlamaktadır. Ancak anodik oksidasyon işleminin, malzemenin yorulma dayanımı üzerinde azaltıcı bir etkisinin olduğu gözlenmiştir.

Alüminyum alaşımları üstün korozyon direncine sahip olmasına rağmen çıplak alüminyum yüzeyi korozyon ortam veya farklı malzemeler ile temas ettiği sürece korozyona uğrayabilmekte ve bu durum ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, servis koşullarına bağlı olarak alüminyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmak için farklı anodizasyon işlemlerinin uygulandığı gözlenmiştir. Bu nedenle uygulanacak yüzey işlem prosesinin malzeme üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, havacılık endüstriden hazır olarak temin edilen AA7050-T7451 plaka ve AA2024-T3 sac malzemeler kullanılarak anodik filmin korozyon direncini ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Alüminyum alaşımları şekillendirilen/dövme ve döküm olmak üzere iki kategoriye ve her bir kategori temel alaşım elementi ve diğer elementlerin oranına bağlı olarak farklı özellikler gösteren alaşım sınıflarına ayrılmaktadır. Tez kapsamında deneysel çalışmalarda, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve yüksek mekanik özelliklere ve korozyon direncine sahip AA7050 ve AA2024 alaşımları tercih edilmiştir.

3.1. Alüminyum ve Alaşımları

Doğada saf olarak bulunmayan alüminyum, yer kabuğunda oksit ve hidroksitlerden oluşan boksit cevheri olarak bulunmaktadır. Yapı olarak boksit cevheri, gibsit, bayerit, böhmit ve diyasporit minerallerinin bir karışımı olup genellikle silis, demir oksit ve titanyum oksit (TiO_2) içermektedir. Gibsit ve bayerit, alümina trihidrattır ($Al(OH)_3$). Bayerit doğada nadiren bulunurken, gibsit önemli mineralden biridir ve doğada bol miktarda bulunmaktadır. Böhmit ve diyaspor ise alümina oksohidroksittir ($AlOOH$) ve boksit cevherinde bulunan diğer iki önemli mineraldir. Boksit cevherinden saf alüminyum elde etmek için 1888'de Carl Josef Bayer tarafından bulunan Bayer metodu ile 1886'da Charles Martin Hall ve Paul L.T. Heroult'un eş zamanlı ve birbirlerinden bağımsız olarak geliştirdikleri metal cevherini işleme yöntemi (Hall-Heroult Proses) kullanılmaktadır. Bu yöntemle alüminyum eldesi üç aşamalı bir süreç ile gerçekleşmektedir. İlk adımda boksit cevherleri yıkanıp küçük toz parçacıklar haline getirilmektedir. Daha sonra bu toz parçacıkları Bayer Metodu kullanılarak alüminyum oksite (Al_2O_3) dönüştürülmektedir. Son adımda ise Al_2O_3 'ün elektroliz işlemiyle bileşenlerine ayrılması, çökeltinin eriyik kriyolit (Na_3AlF_6) banyosunda çözünmesi ve ardından elektrolitik fırında pozitif ve negatif karbon anotlar kullanılarak elektroliz edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu sayede alüminyum oksijenden arındırılmış olmakta ve dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanmaktadır.

Alüminyum ve alaşımları diğer metallerle karşılaştırıldığında, sahip olduğu düşük yoğunluğu, toksik olmayan yapısı, korozyon direnci, yüksek termal iletkenliği, yüksek elektriksel iletkenliği ve kolay işlenebilirliği sayesinde birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Çizelge 3.1'de saf alüminyum malzemesine ait genel özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Saf alüminyumun genel özellikleri [15]

	Yoğunluk, g/cm ³	Young modülü, GPa	Max. çekme gerilmesi, MPa	Akma gerilmesi, MPa	Isıl iletkenlik, W/m°C	Isıl genleşme katsayısı, (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹) (25-100°C)
Saf Alüminyum	2,7	68,9	290	30	221	23,6

Alüminyum sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı, 1930'dan günümüze uçak yapısal parçalarında kullanılan önemli bir mühendislik malzemesidir. Özellikle hava taşıtlarının gövde, kanat ve destek yapılarında alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [10-15].

3.1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ana alaşım elementine bağlı olarak yapılmaktadır. Uluslararası standartlarda kabul görmüş Amerikan Alüminyum Birliği (The Aluminum Association-AA) sistemine göre dövme alaşımlar için dört basamaklı bir sistem kullanılmaktadır. 2xxx'den 8xxx'e kadar olan gruplarda ilk rakam temel alaşım grubunu veya ana alaşım ilavesini gösterir, ikinci rakam orijinal alaşımdaki değişiklikleri veya safsızlık limitlerini gösterir ve son iki rakam özel alüminyum alaşımını belirtmektedir. 1xxx grubu ise saf yakın alüminyumu (alaşımlandırılmamış) temsil etmektedir. Bu grupta ilk iki rakam "10" şeklinde yazılırken son iki rakam minimum saflık yüzdesini göstermektedir. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [15]

Sistemdeki Gösterim	Ana alaşım elementi	Isıl İşlem
1xxx	Alüminyum $\geq$ %99	Soğuk işlem
2xxx	Bakır	Isıl işlem
3xxx	Mangan	Soğuk işlem
4xxx (a)	Silisyum	Soğuk işlem
5xxx	Magnezyum	Soğuk işlem
6xxx	Manganez ve silisyum	Isıl işlem
7xxx	Çinko	Isıl işlem
8xxx	Lityum ve diğer elementler	Isıl işlem
9xxx	Kullanılmayan seri	-
(a) 4032 alaşımı ısıtılabilir.		

Döküm alüminyum alaşımları da dövme alüminyum alaşımlarına benzer şekilde dört basamaklı bir numaralandırma sistemi ile tanımlanmaktadır. Dövme alaşımlardan farklı olarak ondalıklı basamak, alaşımın döküm veya ingot halinde olduğunu göstermektedir. İlk rakam ana alaşım elementine atıfta bulunurken ikinci ve üçüncü basamak 2xx.x'den 8xx.x'e kadar olan gruplarda özel alaşımı, 1xx.x grubunda ise alaşımın saflık yüzdesini belirtmektedir. Son kısımda yer alan ondalık basamak ise, 0 rakamı döküm parçaları, 1 ve 2 rakamları ise döküm için ergitilecek ingot alaşımlarını temsil etmektedir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [20]

Sistemdeki Gösterim	Ana alaşım elementi
1xx.x	Alüminyum $\geq$ %99
2xx.x	Bakır
3xx.x	Mangan
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Titanyum
9xx.x	Diğer bileşenler
xxx.0	Döküm parça
xxx.1	Dökümde kullanılacak ingot
xxx.2	Dökümde kullanılacak ve daha dar kompozisyon aralığına sahip ingot

Ayrıca döküm alaşımların her biri kendi içerisinde varyasyonlar göstermektedir. Bu varyasyonlar genellikle, bir safsızlık seviyesini veya ikincil bir alaşım elementinin varlığını belirtmek için alaşım kodunun başına harfler eklenmektedir. Bu harfler, A ile başlayan ancak I, O, Q ve X hariç olmak üzere alfabetik sırayla atanmaktadır; X deneysel alaşımlar için ayrılmıştır. 356 alaşımı için A356 ve B356 gibi varyasyonlar bulunmaktadır. Bu alaşımlar arasında, minör alaşım elementleri açısından bazı ufak farklar bulunmaktadır. Örneğin, 356 alaşımında maksimum %0,6 oranında demire müsaade edilirken, A356 alaşımında bu sınır %0,2'ye, B356 alaşımında ise %0,05'e gerilemektedir. A356.0, orijinal 356.0'dan daha yüksek saflığa sahiptir [14-20].

3.1.2. Alüminyum alaşımlarında temper tanımlama sistemi

Alüminyum alaşımlarının ana temper tanımları uygulanan mekanik ve ısı işlemler

yardımla belirlenmektedir. Alaşımların mekanik özellikleri çökelme sertleşmesi ısı işlemi ile artırılarak, yüksek dayanım ve tokluğa sahip çeşitli malzemeler üretilebilmektedir. Isıl işlem yardımla mekanik özellikleri artış göstermeyen alüminyum alaşımlarına ise soğuk şekillendirme uygulanmaktadır. Alüminyum alaşımları ısı işlem uygulanabilen alaşımlar ve ısı işlem uygulanamayan alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Isıl işlem görmeyen dövme alüminyum alaşımlarının temper tanımları:

F (fabrikasyon): Belirli bir özellik elde etmek amacıyla ısı işlem ya da deformasyon sertleştirilmesi uygulanmayan alüminyum alaşımlarını simgelemektedir.

O (tavlanmış, yeniden kristalize edilmiş): Üretimden sonra dayanımı düşürmek ve işlenebilirlik kabiliyetini artırmak için tavlama işlemi uygulanan dövme alüminyum alaşımlarını simgeler.

H (deformasyon sertleştirilmesi): Deformasyon sertleştirilmesi uygulanarak dayanımı artırılan alüminyum alaşımlarını simgeler. H harfinin ardından her zaman birden fazla rakam gelmektedir. H harfinden sonra gelen ilk rakam temel işlemlerin spesifik kombinasyonunu göstermektedir:

- H1 (yalnızca deformasyon sertleştirilmesi): Tamamlayıcı ısı işlem olmaksızın istenen mekanik özellikleri elde etmek için yalnızca gerinimle sertleştirilmesi uygulanmaktadır. Bu tanımlamayı takip eden sayı, gerinim sertleşme derecesini göstermektedir.
- H2 (deformasyon sertleştirilmesi ve kısmi tavlama): İstenilen nihai miktarın üzerinde deformasyon sertleştirilmesi ve daha sonra kısmi tavlama ile dayanımı istenilen seviyeye getirilmektedir.
- H3 (deformasyon sertleştirilmesi ve stabilizasyon tavlama): Deformasyon sertleştirmesinden sonra dayanımı az miktarda düşürmek ve sünekliği artırmak için düşük sıcaklıkta ısıtma ile stabilizasyon tavlama uygulanmaktadır. Bu tanımlama yalnızca, stabilize edilmedikçe, oda sıcaklığında kademeli olarak yaşlanmaya tabi tutulan magnezyum içeren alaşımlar için geçerlidir.

H1, H2 ve H3 tanımlamalarını takip eden rakam, deformasyon sertleşmesi derecesini göstermektedir (Çizelge 3.4). Üçüncü hane ise, temper kontrol derecesi veya mekanik özellikler H temperinden farklı olduğunda ancak eklendiği iki basamaklı H temper tanımına yakın olduğunda kullanılmaktadır. The Aluminium Association tarafından rastgele tahsis edilmiş üç basamaklı H temper tanımları:

- H111, kontrollü bir H11 temperi için gereken miktardan daha az deformasyon sertleştirmesi uygulanmış ürünler için geçerlidir.
- H112, sıcak şekillendirme işleminden sonra, soğuk şekillendirme veya tavlamaya tabi tutulmamış ürünler için geçerlidir.
- H311, kontrollü bir H31 temperi için gereken miktardan daha az deformasyon sertleştirmesi uygulanmış ürünler için geçerlidir.
- H321, kontrollü bir H32 temperi için gerekli miktardan daha az gerinimle sertleştirilmiş ürünler için geçerlidir.
- H323 ve H343, özel olarak imal edilen ürünler ve H311, H321, H323 ve H343, %4'ün üzerinde magnezyum içeren sınıflar için geçerlidir.

Çizelge 3.4. H temper kodları ve ısıtıl işlem uygulamaları [20]

Sembol	Isıl işlem uygulaması
H1x	Son işlem haddeleme
H2x	Son işlem tavlama
H3x	Son işlem stabilizasyon tavlama
	H11-H22-H32
	H14-H24-H34
	H16-26-36
	H18-28-38
	H19
	çeyrek sert
	yarı sert
	üç çeyrek sert
	sert
	ekstra sert

Isıl işlem görebilen dövme alüminyum alaşımlarının temper tanımları:

F (fabrikasyon): Belirli bir özellik elde etmek amacıyla ısıtıl işlem ya da deformasyon sertleştirmesi uygulanmayan alüminyum alaşımlarını simgelemektedir.

O (tavlanmış, yeniden kristalize edilmiş, sadece dövme alaşımlar): dövme alaşımlara uygulanan en yumuşak tavidir.

H (deformasyon sertleştirmesi): perçin teli (örnek olarak 7075-H13) dışında genel olarak mevcut değildir.

W: Sadece çözeltiye alma ısıtıl işlemi uygulanarak kendiliğinden yaşlanan alüminyum alaşımlarını simgelemektedir. W harfinden sonra doğal yaşlandırma süresi belirtilebilir (W ½ saat).

T: Çökeltme sertleştirmesi uygulandıktan sonra ek soğuk şekillendirilme uygulanan veya uygulanmayan alüminyum alaşımlarını simgelemektedir. T'yi her zaman 1'den 10'a kadar

bir veya daha fazla rakam izlemektedir. Bu rakamlar ve karşılık gelen ısı işlem uygulamaları Çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. T temper kodları ve ısı işlem uygulamaları [18]

Sembol	Isıl işlem uygulaması
T1	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T2	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T3	Çözeltili alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T4	Çözeltili alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T5	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış
T6	Çözeltili alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış
T7	Çözeltili alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış
T8	Çözeltili alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış
T9	Çözeltili alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T10	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış
T31	Çözeltili alma ısı işlemine tabi tutulmuş, yaklaşık %1 oranında soğuk işlenmiş ve tabii olarak yaşlanmış
T651	Çözeltili alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve iç gerilme alınmış

İlk rakamı takiben gelen ek rakamlar, dövme alaşımların gerilme giderme işlemleri için atanmaktadır [18-22].

- TX51, Çökelme sertleştirilmesi uygulandıktan sonra gerilme giderme işlemi uygulanmıştır.
- TX52, Çökelme sertleştirilmesi uygulandıktan sonra belli miktarlarda sıkıştırılarak gerilme giderme işlemi uygulanmıştır.
- TX53, Isıl işlemle artık gerilmeler giderilmektedir.

Kullanıcı firma tarafından da ısı işlemine tabi tutulmuş dövme alaşımlar için temper kodları kullanılmaktadır:

- T42, çözeltili alma ısı işlemine tabi tutulmuş ve ardından doğal olarak yaşlandırılmıştır.
- T62, çözeltili alma ısı işlemine tabi tutulmuş ve ardından yapay olarak yaşlandırılmıştır.

3.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyonu

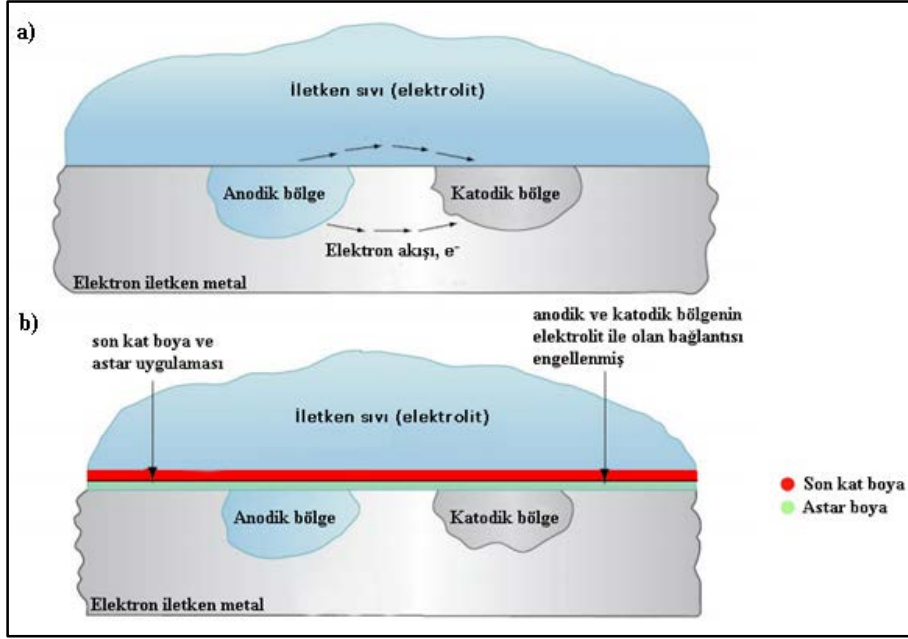
Alüminyum alaşımları yüksek korozyona direncine sahip olmasına rağmen korozyon başlangıcı maddeye veya ortama uzun süreli maruz kalması sonucunda korozyon başlangıcı görülmektedir ve korozyonun ilerlemesi durumunda ciddi hasarların oluşması kaçınılmazdır. Bu nedenle, korozyonun başlangıcı olan bölgeler tespit edilerek kontrol altına alınmalıdır. Korozyonun önlemek için korozyona dayanıklı malzemelerin seçimi, korozyon oluşumunu engelleyecek tasarım değişiklikleri, organik kaplamalar, anodik oksidasyon işlemi başta olmak üzere korozyon kaynaklı hasarların tespitindeki artan farkındalıkla birlikte, mevcut tasarımın ömrü ve yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan ve maliyeti önemli ölçüde artırmadan korozyona karşı koruma sağlanabilmektedir.

3.2.1. Korozyon

Malzemenin bulunduğu ortam ile girdiği kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde fiziksel, kimyasal, elektriksel veya mekanik özelliklerinde meydana gelen istenmeyen değişimler olarak tanımlanmaktadır. Meydana gelen bu değişimler kalıcı hasarlara sebep olabilmekte ve parçaları kullanılamaz hale getirebilmektedir. Malzeme yapısında meydana gelen bu istenmeyen değişiklikler (bozunmalar) korozyon olarak adlandırılmaktadır.

Korozyon malzemenin bulunduğu ortamdan kaynaklı sıcaklık artışı, mikroorganizmaların varlığı/çoğalması, iklim gibi coğrafi etmenler, yoğun nem, tuzluluk ve suyun mineral yoğunluğunun fazla olması gibi atmosferik etmenler ve yapılarda kısıtlandırılmış/kapalı alanlar, çözünmüş gazlar, iyon yüklü materyallerin kontrolleri, ısıtım ve kaynak edilmiş yüzeyler gibi endüstriyel etmenler korozyon oluşmasına neden olmaktadır.

Temelde metal malzemelerin bulundukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu dışardan enerji transferi olmadan doğal olarak meydana gelen korozyonun gerçekleşmesi için dört koşulun sağlanması gerekmektedir; korozyona uğrayacak bir metalin varlığı (anot), korozyona daha az eğilim gösteren farklı bir iletken metal malzemenin varlığı (katot), iletken bir sıvının varlığı (elektrolit), anot ve katot arasındaki elektriksel iletim. Bu koşullardan herhangi birinin ortadan kalkması, Şekil 3.1’de görüldüğü üzere, korozyon oluşumunu önlemektedir [23-29].



Şekil 3.1. Korozyon mekaniği a) Elektrokimyasal korozyon için mevcut olması gereken koşulları gösteren basitleştirilmiş korozyon hücresi b) Metal yüzeye organik film uygulamasıyla korozyonun önlenmesi [29]

3.2.2. Korozyon mekaniği

Enklüzyon, bölgesel gerilme, tane yönlenmesi ve yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler sonucu metal yüzeyinde birbirinden potansiyel olarak farklı bölgeler (anot ve katot) oluşmaktadır. Bu bölgelerden potansiyel bakımından daha asil olan bölgede katodik reaksiyon oluşurken, aktif olan diğer bölgede anodik reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu bölgelerdeki potansiyel farkın oluşumu; metalin yapısal, mekanik, kimyasal veya ısı farklılıkları gösteren bölgelerinin olması, farklı iki metalin birbirine temas etmesi veya ortamda katodik olarak indirgenen bileşenlerin farklı oranlarda metalin farklı bölgelerinde bulunmasından kaynaklanmaktadır.

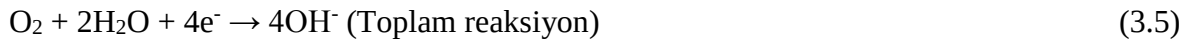
Alüminyumun sulu ortamdaki oksidasyonunun elektrokimyasal reaksiyonu sonucu Al^{3+} iyonu oluşmaktadır. Bu reaksiyona göre anot bölgesindeki alüminyum atomları pozitif iyonlar halinde parçanın yüzeyinden ayrılarak (Eş. 3.1) sıvı çözeltiye geçerken, negatif yüklü elektronlar metal içinde kalmaktadır.



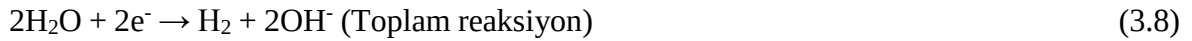
Bu elektronlar katodik bölgeye hareket ederek, çözeltiden metal yüzeyine ulaşan pozitif hidrojen iyonlarını karşılayarak onları nötrleştirirler. Nötr hale gelen iyonların bir araya gelmesiyle hidrojen gazı oluşur (Eş. 3.2). Bu reaksiyon, alüminyum yüzeyindeki pH'ı da artırır ve asidik çözeltiler haricinde veya alüminyuma büyük negatif bir potansiyel uygulanmadıkça genellikle yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir.



Bu reaksiyon, katodik bölgedeki diğer bir reaksiyon olan çözünmüş oksijenin indirgenmesiyle dengelenmektedir (Eş. 3.5).



Oksijensiz veya oksijenin az olduğu ortamda ise Eş. 3.3 ve 3.4 yerini Eş. 3.6 ve 3.7'ye bırakmaktadır.

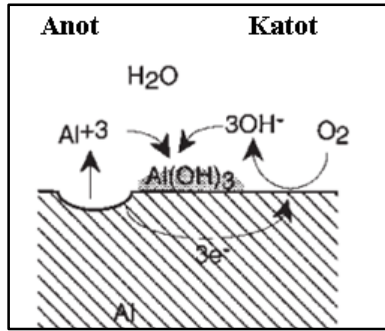


Bu reaksiyonlar devam ettikçe alüminyum anot bölgesinde oksitlenir ve korozyona uğrarken, parçanın katot bölgesi hidrojenle kaplanır. Çözünen metal miktarı, oluşan potansiyel fark ve metal direncine bağlı olan hareketli elektron sayısı veya akım şiddeti ile doğru orantılıdır. Anodik ve katodik bölgede meydana gelen oksidasyon ve indirgemenin elektrokimyasal reaksiyon ürünlerinin tepkimesi sonucunda alüminyum oksit olarak bilenen $\text{Al}(\text{OH})_3$ bileşiği oluşmaktadır (Eş. 3.9 ve 3.10). Oluşan alüminyum hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) beyaz bir jel olarak çökelir ve suda çözünmez. Korozyon çukurlarında bulunan $\text{Al}(\text{OH})_3$, beyaz jelatinimsi ince tabakalar halinde görünmekte ve kurduğunda bayerit oluşmaktadır. 70 derecenin üzerinde ise böhmit, kararlı faz olarak bayeritin yerine geçmektedir. Şekil 3.2'de alüminyumun korozyon mekanizması şematik olarak gösterilmektedir.





Reaksiyonlarda görüldüğü üzere, alüminyumun korozyon gelişimi, etkilenen alüminyum miktarına kıyasla orantısız bir hidrojen hacminin oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum kapalı alanlarda ciddi kazalara neden olabilmektedir [23-25].



Şekil 3.2. Alüminyumda oluşan korozyonun çözünme-çökeltme mekanizması [25]

3.2.3. Korozyon türleri

Korozyonun önlemek için korozyona dayanıklı malzemelerin seçimi, korozyonu hafifletecek tasarım değişiklikleri, organik kaplamalar, anodik oksidasyon, korozyon kontrol programları ve korozyon tahmin modelleri gibi hava araçlarında korozyon kaynaklı hasarların tespitini artırmak için korozyon türlerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Başlıca korozyon türleri:

Genel korozyon

Alüminyum alaşımlarında yaygın olarak görülen korozyon türünden biridir. Metal yüzeyindeki oksit tabakasının çok düşük veya yüksek pH değerlerindeki kararsız yapısı korozyona neden olmaktadır. Bu koşullar dışında alüminyumun genel korozyonu nadiren görülmektedir. Bununla birlikte, birbirine yakın mikro boyutta bulunan çok sayıda ki anot ve katot bölge arasındaki elektrokimyasal etkileşim sonucu oluşmakta ve belli bir bölgede başlayıp metalin tüm yüzeyine yayılma eğili göstermektedir. Resim 3.1’de genel korozyon örnekleri gösterilmektedir.



Resim 3.1. Genel korozyona uğramış yapısal parça [26]

Genel korozyon metal yüzeyini aşındırarak malzemenin incelmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, korozyon hızı, birim yüzey alanı başına kütle kaybı olarak tanımlanmaktadır. Genel korozyonun gözle görülebilir ve korozyon hızının deneyler ile tespit edilebilir olması, bu korozyon türüne karşı önlem alınmasını kolaylaştırmaktadır. Uniform korozyonunun en ağırlaştırıcı etkisi, dış görünümü çok daha az çekici hale getirdiği için estetik dezavantajıdır. En basit koruma yöntemi metal yüzeyi ile ortam arasındaki temasın son kat boya, astar veya anodik oksidasyon ile kesilmesidir [24-26].

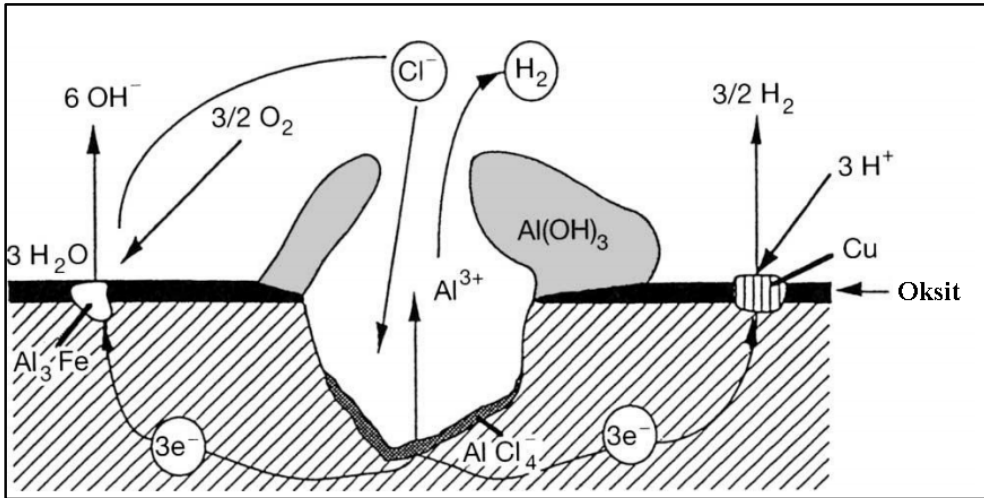
Çukurlaşma korozyonu

Çukurlaşma ya da oyuklaşma, alüminyum alaşımlarında en yaygın korozyon saldırılarından biridir. Bu korozyon türü özellikle sodyum klorür (NaCl) ve oksijen bakımından zengin koroziif ortamlarda ve alaşım çukurlaşma potansiyelinin üzerinde bir potansiyele sahipse meydana gelmektedir. İlk başta metal yüzeyinde bir elektrolit hücrenin sebep olduğu küçük çukurlar olarak kendini göstermekte ve ardından yüzeyi matlaştıran, pürüzlü veya buzlu bir yüzey görünümü oluşturmaya ilerleyebilen üniform bir yüzey aşınmasına neden olmaktadır. Oluşan çukurlar elektroliti çukur içinde hapseder ve elektrolit bileşimindeki değişimler korozyon hızlandırabilmektedir. Resim 3.2’de çukurlaşma korozyonu gösterilmektedir.



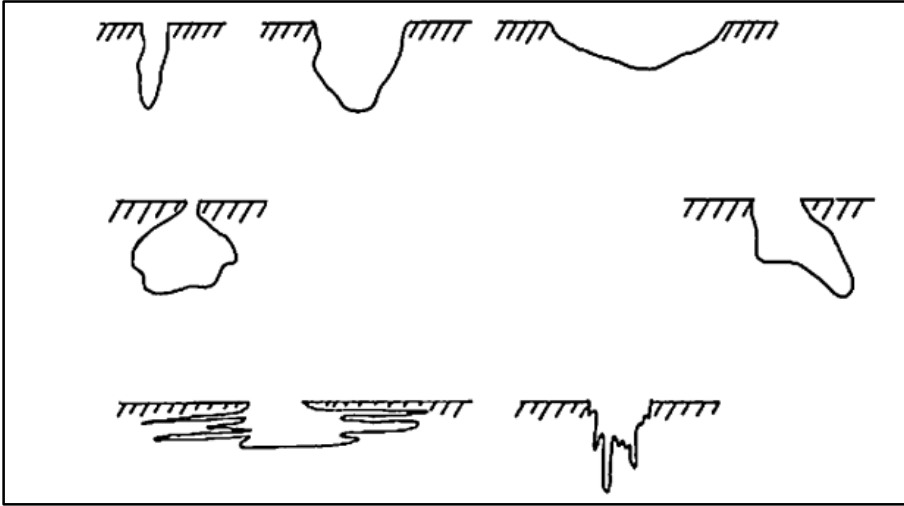
Resim 3.2. Eski uçak motoru krank milinde görülen çukurlaşma korozyonu [29]

Alüminyum yüzeyindeki kusurlardan hızla oluşan bu çukurların bazıları kritik bir boyuta ulaşmaktadır. Ancak korozyon çukurları pasifleşmediğinden dolayı çukur büyümeye devam etmektedir. Çukur asitleştikçe, içindeki katodik reaksiyon hidrojen iyonu oluşumuna elverişli hale gelmektedir. Bu hidrojen iyonlarının suyla reaksiyonu sonucu korozyon çukurun ağız kısmında Şekil 3.3'te görüldüğü üzere $\text{Al}(\text{OH})_3$ çökeltmesine neden olmaktadır.



Şekil 3.3. Kapalı korozyon hücresi oluşumu [25]

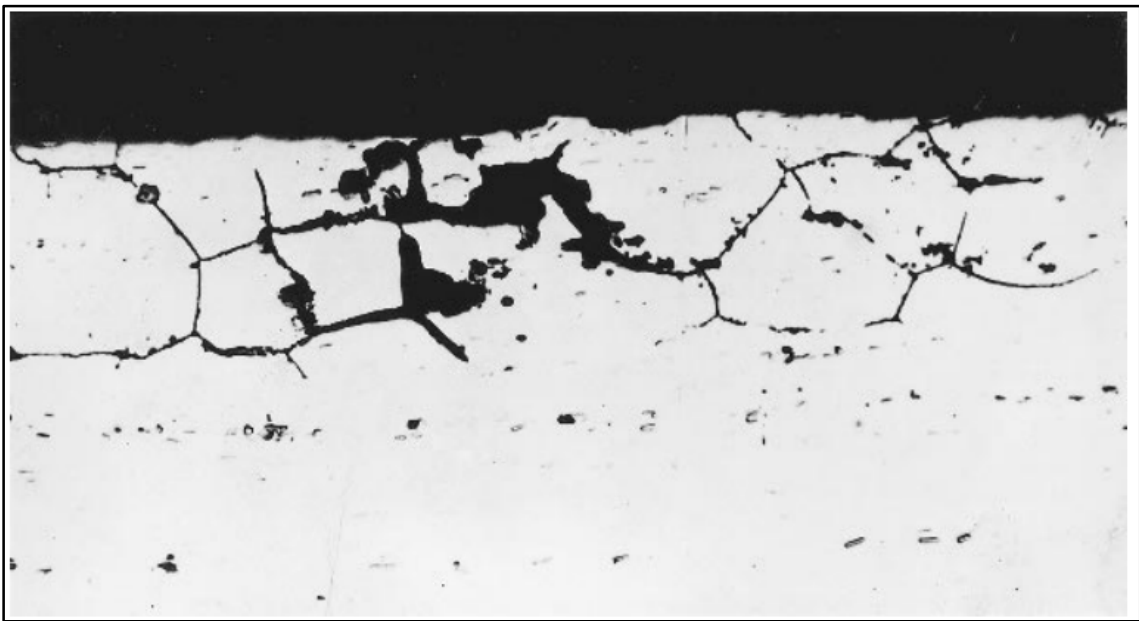
Çukurlaşma korozyonu genellikle dikey veya enine büyüme olarak malzemeye nüfus etmektedir. Şekil 3.4'te farklı tip ve boyuttaki çukur korozyon türleri gösterilmektedir. Çukurlar ayrıca malzeme mukavemetinin azalmasına neden olan yorulma çatlaklarının oluşum mekanizmasını da başlatabilmektedir. Çukurlaşmayı önlemenin en iyi yolu tıkalı hücrelerin başlamasını veya büyümesini engellemektir [24-29].



Şekil 3.4. Farklı tip ve boyuttaki çukurlaşma korozyonu [28]

Taneler arası korozyon

Taneler arası korozyon (IGC), tanelerin veya kristallerin kendilerine kayda değer bir saldırısı olmaksızın, tane sınırlarında bazı bileşiklerin çökmesi sonucu oluşmaktadır. Bu çökeltiler, tane sınırına yakın bölgelerin çökeltiyi oluşturan element bakımından fakirleşmesine sebep olmaktadır. Bu durum tane sınırlarındaki bölgelerde potansiyel farkın oluşmasını sağlayarak tane sınırlarının korozyonuna neden olmaktadır. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere IGC doğrudan tane sınırlarında meydana geldiğinden mikroskop yardımıyla tespit edilebilmektedir.



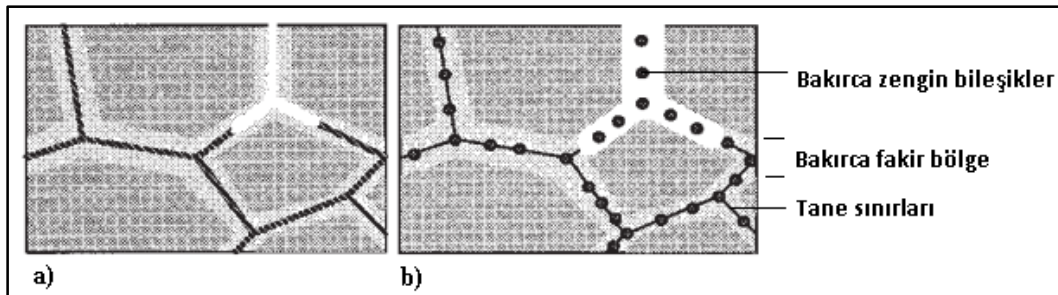
Şekil 3.5. Taneler arası korozyona uğramış alüminyum alaşımı (büyütme 200X) [27]

Taneler arası korozyon çukurlaşma korozyonundan daha hızlı nüfuz etmektedir. Ancak oksijen ve aşındırıcı maddelerin dar korozyon yolunda taşınmasının zorluğu nedeniyle, kendi kendini sınırlayarak belirli bir derinliğe ulaşmaktadır. Penetrasyon derinliği sona erdiğinde, IGC tüm yüzeye yanal olarak yayılmaktadır. Tamamen yeniden kristalize edilmiş tane yapısına sahip malzemelerde IGC, alaşıma ve ısıtılma işlemine bağlı olarak farklı bir görünüme sahip olabilmektedir.

2xxx serisi alüminyum-bakır alaşımları yavaşça soğutulduğunda, tane sınırlarında bakırca zengin büyük çökeltiler (CuAl_2 ve CuMgAl_3) oluşmaktadır. Oluşan bu çökeltiler nispeten katodiktir ve sodyum klorür çözeltisi gibi aşındırıcı bir elektrolitte, bakırdan yoksun tane sınır bölgelerinde elektrokimyasal saldırılara neden olmaktadır.

7xxx alaşımındaki IGC mekanizması, 2xxx alaşımına benzerdir, ancak 7xxx serisi alaşımlarda, çinko ilavesi ve MgZn_2 fazının çözünmesi, bu alaşımların potansiyelini anodik yönde kaydırmaktadır. Bu, saf alüminyum ve alaşımlar arasında potansiyel bir fark oluşmasına sebep olmaktadır. Yine de çökeltme önce tane sınırlarında meydana gelmekte ve daralmış bölge ile çinko / magnezyum açısından zengin taneler arasında bir galvanik hücre temperinde hem de T6 temperinde görülmektedir.

5xxx serisi alüminyum alaşımlarda tane sınırlarında daha aktif bir fazın (Mg_2Al_3) çökmesi sonucu IGC oluşmaktadır. Bu alaşımlar tuzlu suya maruz kaldığında, tane sınırlarındaki çökeltiler çözülür (Şekil 3.6 a)) ve dolayısıyla taneler birbirinden ayrılmaktadır. Yüksek magnezyum içeren alaşımlar uygun şekilde imal edilip, elverişli koşullarında kullanıldığında IGC oluşmamaktadır.



Şekil 3.6. Taneler arası korozyon a) Aktif bir tane sınır çökeltilerinin çözünmesi b) Asil bir tane sınırı çökeltileri etrafında tükenmiş bir matrisin çözünmesi [25]

6xxx serisi alaşımlarda, Mg_2Si bileşeninin oluşumuyla sonuçlanan dengeli bir magnezyum-silikon bileşimi ile, taneler arası saldırı küçüktür. 6xxx alaşımı aşırı miktarda silikon içerdiğinde (Mg-Si oluşturmak için gerekenden daha fazla), çözünmeyen silikon bileşenin güçlü katodik yapısı nedeniyle taneler arası korozyon artar. Taneler arası korozyon özellikle atmosfere veya sert kimyasal ortamlara maruz kalan 6xxx-T6 ürünlerinde yaygın olarak görülmektedir.

1xxx ve 3xxx serisi gibi tane sınırlarında ikinci faz mikro bileşenleri oluşturmeyen alaşımlar IGC'ye duyarlı değildir [25-31].

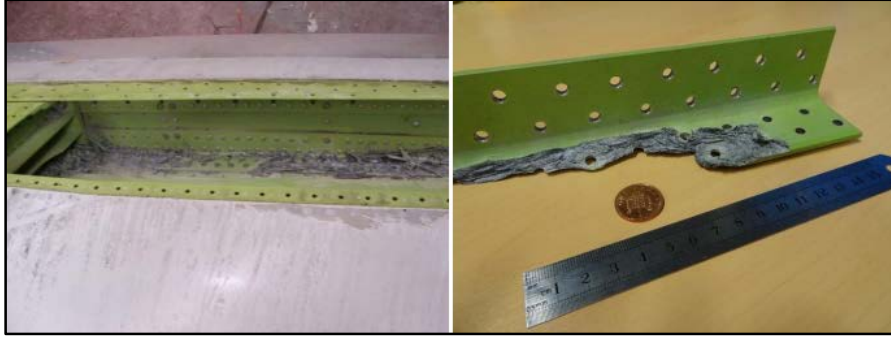
Pullanma korozyonu

Soyulma, tabakalı veya katmanlı korozyon olarak da adlandırılan pullanma korozyonu, taneler arası korozyonun ilerlemiş halidir ve hadde yönünde uzunlamasına tane sınırları boyunca meydana gelmektedir. Korozyon, metal yüzeye paralel yüzey altı tane sınırlarında yanal taneler arası korozyon olarak başlar, ancak oluşan sıkışmış korozyon ürünü ana metalin hacminden daha büyük bir hacme sahiptir ve artan hacim katmanları ayırmaya zorlayarak metal katmanları pul pul dökülmektedir. Pul pul dökülme, ince nispeten aşınmamış metal katmanları ve orijinal metale göre daha büyük hacimli daha kalın korozyon ürünü katmanları ile karakterize edilmektedir (Şekil 3.7). Korozyon ürünlerinin katmanları metalin şişmesine neden olmaktadır. Bu dökülme, korozyonun sürekliliği için gereken metal yüzeyi sağlayarak kendini sınırlayıcı bir hale gelmemektedir.



Şekil 3.7. Çıplak durumda altı yıl deniz suyuna maruz kaldıktan sonra 7075-T6 alaşımında görülen pullanma korozyonu [25]

Genellikle haddelenmiş, uzun tane yapılarına sahip nispeten ince ürünlerde, kabarma ve pul pul dökülerek kendini göstermektedir. Pullanma korozyonu genellikle yüzeyden içe doğru ilerlemek yerine, yana doğru ilerleme eğilimi göstermektedir. Resim 3.3'te Boeing 757 alt kanatçığındaki incelemede şişkinlik tespit edilemesi ve daha sonra inceleme için yapı açıldığında pullanma korozyonuna uğrayan parça ile karşılaşılmıştır [25-29].



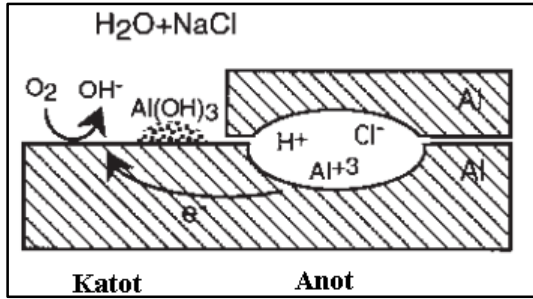
Resim 3.3. Boeing 757 kanatçık parçasında görülen pullanma korozyonu [29]

Aralık korozyonu

Aralık korozyonu, aşındırıcı maddelerin malzemelerde bulunan çatlaklara veya montajda giderilemeyen dar bölge ve aralıklara nüfuz ederek korozyona neden olmaktadır. Aralığı oluşturan malzemelerin her ikisinde metal olması gerekmez, yalnızca birinin metal olması yeterli olmaktadır. Bu korozyon genelde göz önünde olmayan boşluklarda meydana geldiği için fark edilmesi zordur. Özellikle montaj sonrası oluşan boşluk/aralıkların nemlenmesi, boşluğun içinde ve dışında oksijen reaksiyonu ile korozyon başlangıcını tetiklemektedir. Zamanla, alüminyumun çözünmesi ve çökmesi boşluğun içinde oksijenin tükenmesine neden olacaktır. Boşluğun dar olması, oksijenin içeri doğru difüzyonu kısıtlamakta ve Denklem 3.9 ve 3.10'daki çökme reaksiyonları ile çatlak asidik hale gelmektedir. Oksijen yoğunluğunun dışarı göre az olması potansiyel bir farklılık meydana getirip anot-katot hücresi oluşturmaktadır. Aralık dışında kalan bölge oksijen bakımından zengin olduğundan katot, aralık içi ise anot görevi görmektedir.

Şekil 3.8'de aralık korozyon oluşum mekaniği gösterilmektedir. Başlangıçta nötr olan yarık, seyreltik bir hidroklorik asit ortamının oluşması nedeniyle kademeli olarak asidik hale gelmektedir. Bu asidik ortam, çatlak ortamının elektriksel nötrlüğünü korumak için anyonları çeken H^+ katyonları içermektedir. Alüminyumun anodik çözünmesi çatlak

içindeki asidik ortamda giderek hızlanır ve oksijenin azalmasıyla katodik reaksiyon çatlak ağzının dışında gerçekleşir.

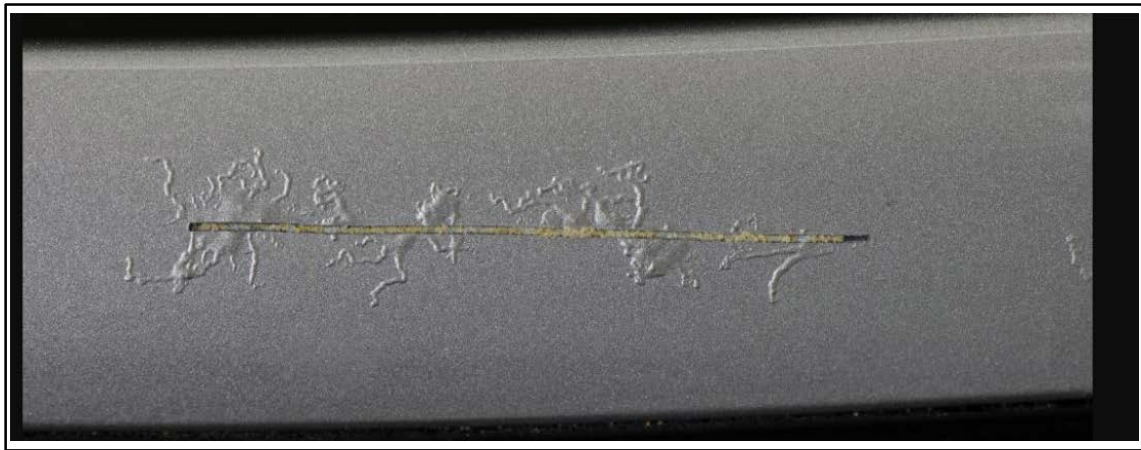


Şekil 3.8. Aralık korozyon mekanizması [25]

Çatlak korozyonu, boşluklar dolgu macunu ile kapatılarak veya dış yüzeyin kaplanmasıyla katodik reaksiyon için mevcut alan en aza indirilerek önlenabilmektedir [25-32].

Kabuk altı korozyon

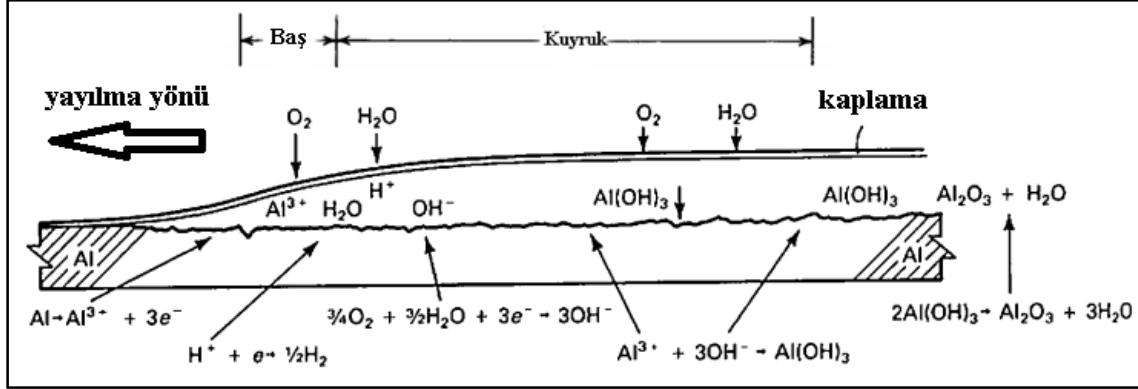
Kabuk altı korozyon, yüzeye uygulanmış organik kaplama altında oluşan bir korozyon çeşitidir ve rasgele yönlerde bir veya daha fazla kaynaktan çıkan ince hatların ortaya çıkmasıyla karakterize edilmektedir. Korozyon başlangıcı genellikle kaplamadaki bir kusur veya mekanik çizikten kaynaklanmaktadır (Resim 3.4).



Resim 3.4. Yüzeydeki çizikten kaynaklı oluşan kabuk altı korozyon başlangıcı [29]

Alüminyumda yaygın olarak görülen kabuk altı korozyon, kaplamanın altında korozyon ürünlerinden oluşan ince tüneller oluşturmaktadır. Bu hatlara genellikle, ipliksi bir yapıya

veya örümcek ağı benzetilmektedir. Ana form Şekil 3.9’da görüldüğü üzere aktif bir kafa ve kuyruktan oluşmaktadır.



Şekil 3.9. Alüminyumdaki kabuk altı korozyon hücresinin şematik gösterimi [28]

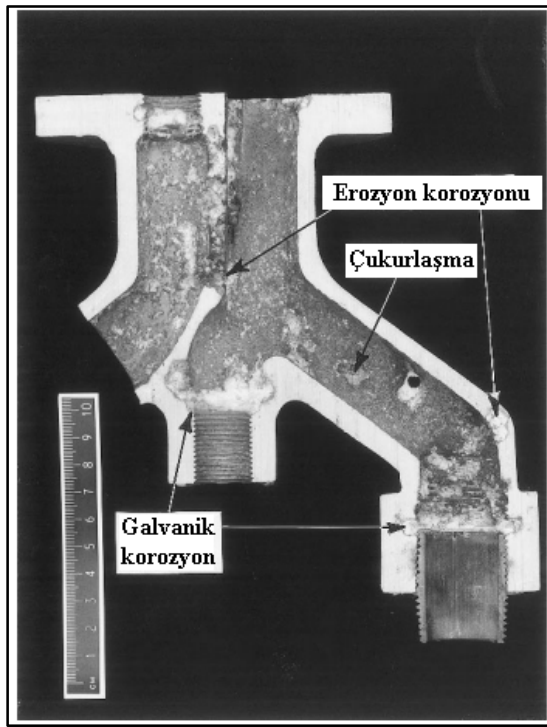
Kabuk altı korozyon yalnızca atmosferde meydana gelir ve bağıl nem en önemli faktördür. Bu korozyon türü, alüminyumda yaklaşık %55 bağıl nemin altında veya %95'in üzerinde nadir olarak görülmektedir. Doğal atmosferlerde, alüminyum üzerinde en kolay şekilde %85 ile 95 arasındaki bağıl nemlerde oluşmaktadır. Organik kaplamanın sıcaklığı ve kalınlığı küçük faktörler olmasına rağmen, ortam sıcaklığındaki artışı, bağıl nem kritik aralıkta olduğu sürece korozyon hızını artırmaktadır. Oksijenin varlığı, katodik reaksiyon için birincil reaktantı sağladığından çok önemlidir. Bu korozyon, anodik alanın filamentin başı olduğu ve katotun kuyruk dahil onu çevreleyen alan olduğu bir tür oksijen konsantrasyonu hücresidir. Kusurların boya veya cila ile kapatılması ve bağıl nemin düşük tutulmasıyla bu korozyon türü kolaylıkla önlenabilmektedir [28-29, 33-39].

Erozyon korozyonu

Belli bir hızdaki akışın olduğu metal borular veya diğer ekipmanların fiziksel olarak aşınmasıyla oluşan hasar erozyon korozyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu korozyon, akışkanın türünden, dinamik özelliklerinden, akışkanın ve ortamın termodinamik özellikleri ile malzeme türü, geometrisi ve imalat yöntemine bağlı olarak da farklı şiddetlerde olabilmektedir. Bununla birlikte akışkan içinde bulunan aşındırıcı parçacıklar korozyon hızını etkileyen diğer bir etmendir.

Sıvı içindeki aşındırıcı bileşenler birçok metalin korozyon oluşumunu hızlandırmaktadır, ancak akışkan içinde erozyon etkisini artıran katı partiküllerin sayısındaki artış, ağırlık oranını arttırmasından dolayı erozyon korozyonu büyüme hızını yavaşlatmaktadır. Aşındırıcı parçacıklar olsun ya da olmasın hareket eden belli bir hızdaki akışkana maruz kalan pek çok şey erozyon korozyona karşı hassastır.

Alüminyum alaşımları gibi çok sert olmayan metallerde erozyon korozyonu sıklıkla görülmektedir. Bu nedenle, erozyonun önemli bir faktör olduğu uygulamalar için tercih edilmemektedir. Diğer korozyon türlerinde olduğu gibi metal yüzeyindeki koruyucu kaplamaların veya oksit filmin hasar görmesi veya tahrip olması, ana metali aşındırıcı bir ortamda korumasız bırakarak zamanla metalin aşınmasına neden olmaktadır. Akış yönünde oluşan boşluk veya çukurlar en belirgin erozyon korozyon göstergesidir. Resim 3.5'te eşzamanlı meydana gelen korozyon çeşitleri gösterilmektedir.



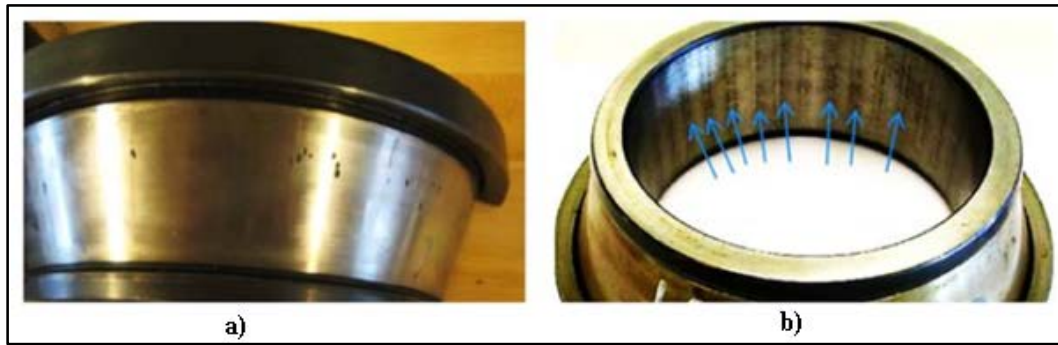
Resim 3.5. Eşzamanlı olarak meydana gelen birkaç yerel korozyon; çukurlaşma, galvanik korozyon ve erozyon korozyonu [27]

Erozyon korozyonu, su kimyası değiştirilerek, akışkanın hızı azaltılarak, pH değeri 9'un altına düşürülerek ve içerdiği karbonat ve silika seviyeleri azaltılarak önlenabilmektedir. Alınan bu önlemler neticesinde, alüminyumun erozyon korozyonu saf suda yavaşlayacaktır.

Ancak yüksek karbonat ve yüksek silika içeren suyun pH değeri 9'u geçtiği durumlarda korozyon tekrar hızlanabilmektedir. pH değiştirilemediği durumlarda, korozyonu azaltmak için kapalı döngü suyunu AlO_2^- ile doyurmak yeteli olmaktadır [27-30].

Aşındırma korozyonu

Aşındırma korozyonunda, birbirine göre hareketsiz ve temas halindeki parçaların nispi hareketleri sürtümeye sebep olarak metal yüzeyindeki koruyucu katmanda hasar oluşturmaktadır. Bu durum, metal yüzeyini doğrudan atmosfere veya korozif ortama maruz bırakarak metal yüzeyinde çukurlaşma ya da çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, temas yüzeyinin kısıtlı hareketi, uflanmaların kolay bir şekilde atılmasını engellediğinden, Resim 3.6'da görüldüğü üzere lokal bir aşınma meydana getirmektedir.



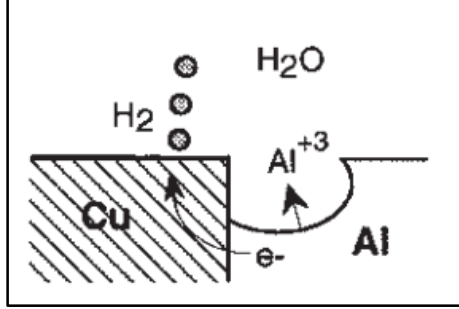
Resim 3.6. Aşındırma korozyonu a) Rüzgar türbini dişli kutusunda kullanılan ve zamanından önce bozulan bir konik makaralı rulmandaki eksenel çatlaklar b) Halka deliği üzerinde aşındırıcı korozyon bantları [43]

Hava taşıtlarında sürtünme korozyonu sıklıkla, iniş takım dikmelerindeki burçlar, çok küçük toleranslarla burçlara geçirilen cıvatalar ve kanadı gövdeye bağlayan kaplama kısımlarda görülmektedir. Sürtünme korozyonunu, titreşim sönümleme, bağlantıların sıkılması, bir yağlama maddesi uygulanması veya iki yüzey arasına aşınmaya dayanıklı bir malzeme yerleştirilerek önlenabilir [27-30, 40-41, 43].

Galvanik korozyon

İletken bir ortamda daha asil bir metal veya grafit gibi metalik olmayan bir iletkenle elektrik teması nedeniyle aralarında potansiyel bir fark oluşarak, birinden diğerine doğru elektron akışı meydana gelmektedir. Bu durum bir metalin hızlandırılmış korozyonuna diğer bir

tasvirle galvanik korozyona (Resim 3.10) neden olmaktadır. Elektron veren metal anot ve eletron alan metal katot görevi görmektedir. Galvanik korozyonda, katodun yüzey alanı sınırlayıcı faktörlerden biridir ve katot yüzeyinin küçülmesi maksimum katodik akımını azaltarak korozyonu yavaşlatacaktır.



Şekil 3.10. Daha asil bir metalle (bakır) temas halindeki alüminyumun galvanik korozyonu (Alüminyum anot ve bakır katod görevi görür) [25]

Alüminyum doğası gereği elektronegatif malzemeler arasında yer almaktadır. Çizelge 3.6’de standart elektrot potansiyel sıralaması gösterilmektedir. Bu çizelgeye göre alüminyumun sıralamada üzerindeki malzemelerle temas halinde olması durumunda galvanik korozyona uğrayacaktır.

Çizelge 3.6. Standart elektrot potansiyel çizelgesi [25]

Reaksiyon	Potansiyel (V)
$\text{Au} \leftrightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1,42
$\text{Pt} \leftrightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,20
$\text{Pd} \leftrightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,83
$\text{Ag} \leftrightarrow \text{Ag}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,80
$2\text{Hg} \leftrightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,80
$\text{Cu} \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,34
$\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0
$\text{Pb} \leftrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,12
$\text{Sn} \leftrightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,14
$\text{Ni} \leftrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,23
$\text{Co} \leftrightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,27
$\text{Cd} \leftrightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,40
$\text{Fe} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,44
$\text{Cr} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,71
$\text{Zn} \leftrightarrow \text{zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,76
$\text{Ti} \leftrightarrow \text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^-$	-1,63
$\text{Al} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,66
$\text{Mg} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,38
$\text{Na} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2,71

Alüminyumun galvanik korozyonu deniz suyu gibi yüksek iletkenlik gösteren ortamlar dışında nadiren görülmektedir. Ortam koşullarının galvanik korozyona etkisini incelemek için, en aktif metaller en üstte ve en inaktif metaller altta olacak şekilde metallerin korozyon potansiyellerine göre düzenlendiği galvanik seriler oluşturulmaktadır. Koruyucu uygulamalar galvanik korozyonu önlemeye yardımcı olmasına rağmen, galvanik olarak farklı metallerin doğrudan temasından kaçınılması etkili bir önlem olarak görülmektedir. Doğrudan temas halinde (Perçin bağlantılarında) montaj boşlukları kapatılmalı, katodik alan kaplanmalı ve ürün su akışını kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalıdır [24-31].

Gerilme korozyon çatlağı

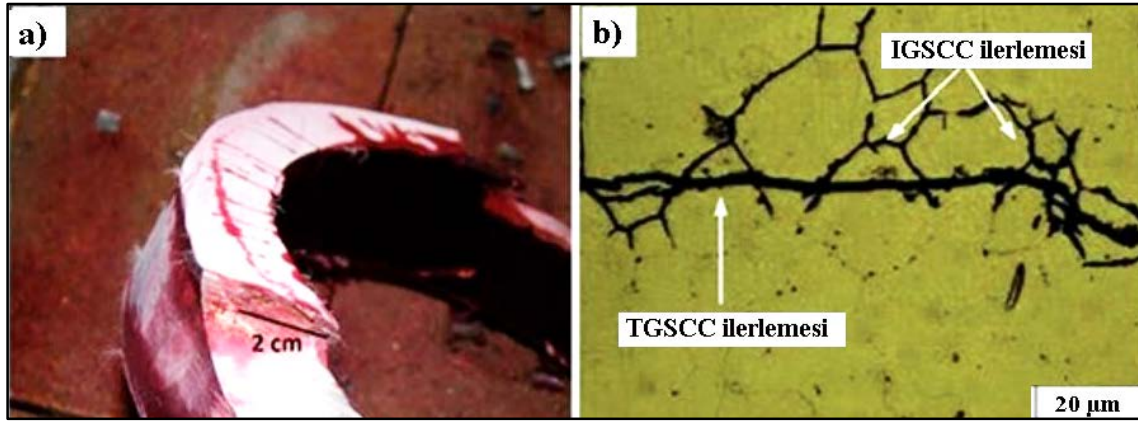
Gerilme korozyon çatlağı (SSC), sünek bir malzemenin erken kırılmasına neden olabilecek sürekli statik gerilme ve koroziv ortamdan kaynaklı aşındırıcı saldırıların bir kombinasyonu sonucu oluşmaktadır. Sürekli basma gerilmelerine maruz kalmak SSC'nin gerçekleşmesini önlemektedir. Ancak akma gerilmesinin altındaki çekme gerilmeleri SCC'ye neden olabilmektedir.

Başta bakır, magnezyum, silikon ve çinko olmak üzere yalnızca kayda değer miktarda çözünür alaşım elementleri içeren alüminyum alaşımları SCC'ye duyarlıdır. Bu nedenle SCC'ye yüksek derecede direnç sağlayan temperler geliştirilmiştir. Ancak aynı tempere sahip farklı alüminyum alaşımlarının SCC'ye olan duyarlılığı farklılık göstermektedir.

1950'lerde SCC dayanıklılığı ile bilinen 7079-T651 alaşımının, yapılan çalışmalar sonucunda son derece kötü SSC direncine sahip olduğunu görülmüştür. Doymuş NaCl solüsyonundan günlerce bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen korozyon testleri sonucunda 7079-T651 alaşımı 7075-T651 alaşımı ile karşılaştırıldığında, pürüzsüz yüzeyde gerilme korozyonu çatlağının başlaması uzun zaman almasına rağmen, 7079-T651 alaşımında çatlak ilerlemesinin diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla çok hızlı olduğu gözlemlenmiştir.

Alüminyum alaşımlarında gerilme korozyonu çatlaması karakteristik olarak iki modda meydana gelebilir; daha yaygın form olan taneler arası gerilme korozyonu çatlaması (IGSCC) ve tane içi gerilme korozyonu çatlamasıdır (TGSCC).

IGSCC'de çatlak, elektrokimyasal teoriye göre, tanecik sınırları boyunca onları mikroyapının geri kalanına anodik yapan bir koşul gerektirmekte, böylece korozyon seçici bir şekilde tabe sınırları boyunca yayılmaktadır. En anodik bölgeler, sınırların kendileri (en yaygın olarak, içlerinde oluşan çökelti) veya tamamen fakirleşmiş sınırlara bitişik bölgeler olabilmektedir. IGSCC büyümesi, uygulanan gerilmenin yönüne dik olarak meydana geldiğinden dolayı uygulanan gerilme uygun şekilde yönlendirilmiş tane sınırlarını açmaktadır (Resim 3.7 a)). Tane içi gerilme korozyon çatlaması tane sınırlarından bağımsız olarak çatlaklar taneleri keserek ilerlemektedir (Resim 3.7 b)). Alüminyum alaşımlarında ara sıra tane içi gerilme korozyonu çatlaması görülmektedir. SCC çatlakları ağırlıklı olarak yüksek açılı tane sınırları boyunca büyümektedir.



Resim 3.7. Gerilme korozyon çatlamasının makroskobik ve mikroskobik özelliği a) Arızalı bir borunun kesiti ve üzerinde makro dallanma çatlaklarının oluşumu b) IGSCC ve TGSCC ilerlemelerinin optik mikroskop görüntüleri [47]

SSC karşı yüksek direnç sağlam için tane sınırları boyunca çökeltisiz mikro yapılar veya taneler içinde olabildiğince homojen olarak dağılmış çökelti oluşturulmalıdır. İkinci durumda, mikroyapı boyunca çökelmiş veya fakir bölgelerin varlığı, anodik bölgelerin toplam alanının katodik bölgelere oranını artırması sayesinde anodik bölgelerdeki korozyon akımını azalmakta ve sınırlar boyunca korozyon en aza indirebilmektedir. Alüminyum alaşımlarının uygun işlemler ile SCC'ye karşı daha fazla dayanıklı hale getirilmekte ve ayrıca taneler arası korozyona karşı da dirençleri arttırılmaktadır. Çoğu alaşım için bu iki tür hasara karşı optimum direnç seviyeleri, farklı işlemler gerektirmektedir. Gerilmeli korozyonu önlemenin diğer yolu ise uygulanan gerilmenin büyüklüğünü en aza indirmek veya yüke maruz kalan alanı genişletmektir [25, 30, 44-49].

Mikrobiyolojik korozyon

Deniz suyundaki iyon ve mikroorganizma aktiviteleri, metal yüzeyini elektrokimyasal olarak korozyona uğratmakta veya başka nedenlerden dolayı önceden oluşmuş çukur korozyonu, çatlak korozyonu, gerilme korozyon çatlaması ve pullanma korozyonunu hızlandıracak ortamı oluşturmaktadır. Mikroorganizmalar metal yüzeyine yapışarak burada kolonileşir, çoğalır ve bir biyofilm üretmektedirler. Biyofilmde pH, çözünmüş oksijen, klorür ve sülfat gradyanları bulunur ve bu film lokal korozyonun başlamasına elverişlidir. Resim 3.8’de, farklı korozyon mekanizmalarının etkin olduğu görülebilmektedir: muhtemelen deniz atmosferi nedeniyle kolonun yukarıdaki bölümünün genel korozyonu ve kolona yapışmış deniz canlılarının sebep olduğu MIC.



Resim 3.8. Deniz suyuna mazuz kalan bir sütundaki genel ve mikrobiyolojik korozyon [53]

İki tür mikroorganizma vardır; sülfür oksitleyen bakteriler ve demir bakterileri gibi aerobik bakteriler ve deniz tabanı toprağında, deniz suyunda ve yer altı boru hatlarında yaygın olarak bulunan sülfat azaltıcı bakteriler (SRB) gibi anaerobik bakteriler [58]. Günümüzde SRB, mikrobiyolojik olarak etkilenen korozyonun (MIC) nedeni olarak en çok tanınan bakterilerdir. En yaygın microorganizmalar ve eylemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Büyümek için organik bir karbon kaynağına ihtiyaç duyan heterotrofik bakteriler. Şekerler, proteinler, selüloz, polimerler gibi birçok organik maddeyi özümseyebilirler. Bunları ya karbondioksit'e dönüştürürler ya da organik asitler olarak salınan metabolitleri çoğaldıkları ortama sentezlerler. Korozyon, ortamdaki değişikliklerden

kaynaklanmaktadır (bakterilerin kendileri değil).

- Ototrofik bakteriler, enerjilerini kimyasal veya fotokimyasal reaksiyonlardan çekerek yalnızca inorganik elementlerin varlığında büyürler. Alüminyum ve alaşımları için ototrofik bakteri bilinmemektedir.
- Mantarlar heterotrofik organizmalardır. Korozyona neden olabilecek birçok organik asidi sentezledikleri için ciddi bozunmaya neden olabilirler.
- Algler, büyümek için ışığa ihtiyaç duyan ototrofik organizmalardır. Algler, anaerobik mikroorganizmaların, özellikle sülfat azaltıcı bakterilerin gelişimini teşvik eden büyük müsilaçlı kütleler oluşturarak bakteriler veya mantarlar tarafından kullanılabilen bir organik madde kaynağı oluşturur. Diğer mikroorganizmalar için oksijen, organik asitler ve besinler üreterek, korozyon olablen bir ortam sağlarlar. Su esastır ve mikroorganizmalar büyümeleri için gerekli olan mineral besinlere (karbon, nitrojen, fosfor, kükürt vb.) ve bir enerji kaynağı veya büyüme faktörü olarak kullanılabilen organik maddelere ihtiyaç duymaktadır.

Alüminyumun mikrobiyolojik korozyonu (MIC) yaygın olarak jet uçağı yakıt tanklarında görülmesinin yanında tuvalet ve kabin zeminleri gibi ticari uçakların belirli bölgelerinde de görülmektedir. Yakıtın içerdığı su, çevredeki yapı ile doğrudan temas halinde olduğu entegre alüminyum yakıt tankları ve borularında birikmektedir. Benzer durum uçuş sırasında yüksek rakımlarda soğutmanın etkisi altında havadaki nemden yoğunlaşan su için de geçerlidir. Yakıt deposunda bulunan su sayesinde mikroorganizmaların gelişmeleri için gerekli olan besini su ve gazyağı arayüzünde bulabilmektedir. Mikroorganizmaların bol olduğu bir ortamda alüminyum çeşitli derecelerde şiddetli korozyona uğrayabilmektedir.

Alüminyum korozyonuna neden olan ana mikroorganizma türü, *Hormoconis resinae* adı verilen bir mantar türüdür. *Hormoconis resinae*'nin kahverengi mukussu yapısı alüminyum alaşımlarının büyük bir bölümünü kaplayarak mikroplar ve farklı havalandırma hücreleri tarafından üretilen organik asitler nedeniyle çukurlaşma, pullanma ve taneler arası saldırıya neden olabilmektedir. Bu mantar, çeşitli organik asitler (pH 3-4 veya daha düşük) üretir ve belirli yakıt bileşenlerini metabolize etmektedir. *Hormoconis resinae*, oksidasyon için karbon kaynağı olarak kullandığı gazyağı ve diğer hidrokarbonların varlığında gelişme yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda, aşırı sıcaklıklarda hayatta kalabilen, ancak daha ılımlı koşullar geçerli olduğunda filizlenecek sporlar üretmektedir. Bu mantar, yakıt depolama tanklarında ve hava taşıtlarının alüminyum entegre yakıt tanklarında devam eden bir

sorundur. Jet uçaklarının alüminyum yakıt tanklarındaki mantar büyümesi sorunu, yoğunlaşmış suyun drenajını kolaylaştırmak için yakıt tanklarının tasarımının iyileştirilmesi ve etilen glikol monoetil eter ve organoboranlar gibi biyositlerin yakıt katkı maddesi olarak kabul görmesi nedeniyle son yıllarda azaltılmıştır [52-58].

3.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Anodik Oksidasyonu

Atmosferik koşullara maruz kalan alüminyum alaşımlarının yüzeyinde, oksijene karşı dirençli reaktif olmayan ince bir alüminyum oksit tabakası doğal olarak oluşmaktadır. Geniş bir pH aralığında ($4 < \text{pH} < 8.5$) stabil olan bu oksit tabakası mekanik bir hasar durumunda kendini yenileyerek korozyona karşı sürekli bir koruma sağlamakta ancak düşük veya yüksek pH değerlerinde bu tabaka çözünmektedir.

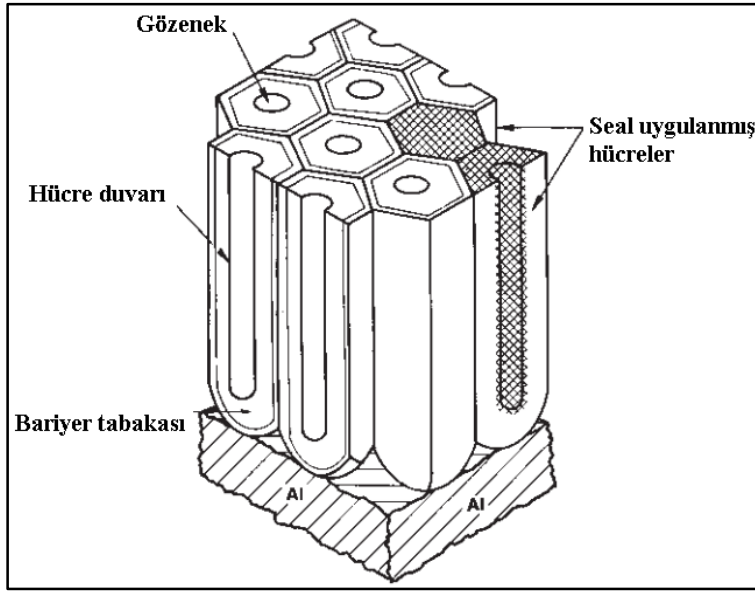
Koruyucu oksit tabakasının doğal oluşumuna benzer şekilde, bir elektrolit yardımıyla yüzey tabakası, alt katman metalin kimyasal reaksiyonu ile kalınlığını ve yoğunluğunu artırılmış kararlı bir oksit tabakaya dönüşmektedir. Bu yöntem, anodik oksidasyon, anotlama, anodizasyon veya eloksal olarak adlandırılmaktadır. Oksit film oluşumuna bağlı olarak farklı hidratlanmış türlerde bulunmaktadır.

Primary Adhesive Bonded Structure Technology (PABST) programı, termodinamik olarak en kararlı alüminyum oksitleri ve bunların üretim yöntemlerini ayrıntılı olarak incelediğinde en kararlı oksitler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Korindon, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, (susuz alfa-alüminyum oksit, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
- Diyaspor, $\beta\text{-AlOOH}$, (beta-alüminyum oksit monohidrat, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Böhmit, $\alpha\text{-AlOOH}$, (alfa-alüminyum oksit monohidrat, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Bayerit, $\beta\text{-Al(OH)}_3$, (beta-alüminyum oksit trihidrat, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

Korindon ve diyaspor oksit tabakası olarak uygun olmalarına rağmen oluşum sıcaklıkları üretim için uygun değildir. Böhmit, en kararlı, tekrar üretilebilir oksittir ve oksit tabakasının kalınlığı ve yapısı işleme parametreleri ile kontrol edilebilmektedir. Bir sonraki, doğal olarak oluşan ve en az kararlı olan bayerittir. Bayerit, yaklaşık 65°C 'ye kadar ortamda bulunan nemden kaynaklı alüminyum yüzeyinde doğal olarak oluşmaktadır.

Anodik oksidasyon sonrası alüminyum üzerinde oluşturulan oksit tabakası yapısı bakımından iki kısımdan oluşmaktadır; kalın gözenekli bir dış tabaka ve çok daha ince fakat kompakt bir iç katman, bariyer tabakası. Alüminyum üzerinde oluşan gözenekli tabaka ağırlıklı olarak amorf alümina bazı boehmit ve gerçek bileşimleri sıvı elektrolit çözeltisi tarafından belirlenen alüminyum oksit bileşikleri içermektedir. Şekil 3.11’de anodik kaplama yapısı şematik olarak gösterilmektedir.

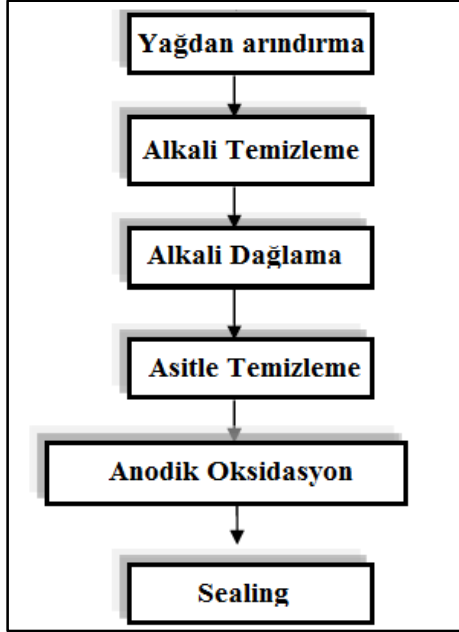


Şekil 3.11. Kesiti alınmış oksit tabakasının şematik görünümü [25]

Anodik oksidasyon prosesi birçok aşamadan oluşmaktadır ve bu işlemin ilk aşaması, ön yüzey hazırlama işlemleridir. Anodik oksidasyon öncesi malzemeleri yağ, organik kir ve mevcut lekelerinden arındırmak için yağdan arındırma (vapor degreasing), alkalik temizleme (alkaline clean), alkali dağlama (alkaline etching) ve asidik temizleme (acid pickling) işlemleri sırasıyla uygulanmaktadır.

Bu ön hazırlık işlemleri, anodik oksidasyonun alt tabaka yüzeyine homojen bir şekilde etki etmesini sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Bu sayede, oksit film tabakasında olumsuz etki oluşturacak unsurlar ortadan kaldırılarak korozyona karşı yeterli koruma elde edilmektedir. Bu işlemlerin ardından anodik oksidasyon işlemi uygulanarak malzeme yüzeyinde kararlı bir oksit tabakası oluşturulmaktadır.

Oluşan bu oksit tabakasındaki gözenekler daha sonra tespit işlemi (seal) ile kapatılmaktadır. Bu işlem oksit tabakanın daha iyi bir korozyon direnci göstermesi için uygulanmaktadır. Şekil 3.12’de anodik oksidasyon prosesindeki tüm aşamaların akış şeması gösterilmektedir. [25, 66-67].



Şekil 3.12. Anodik oksidasyon işlemindeki tüm proseslerin akış şeması

Yağdan arındırma (Degreasing):

Bu işlem, talaşlı veya talaşsız imalat sonrası metal yüzeyinde bulunan yağ, organik kir ve mevcut kirleri yüzeyden uzaklaştırmak için uygulanmaktadır. Yüzeyde bulunan bu kirletici maddeler, anodik oksidasyon ile oluşturulacak oksit film yapısını etkilemekte ve korozyona karşı yeterli korumanın sağlanmasını önlemektedir. Bu nedenle yüzeyi kirletici maddelerden temizlemek için çözücü buhar veya organik çözücüler kullanılmaktadır. Bu ön yüzey temizleme işlemi, daha sonra uygulanacak olan adımların alt tabaka yüzeyinde homojen bir şekilde etki etmesini sağlamaktadır [59-60].

Alkali temizleme:

Yağdan arındırma işleminden sonra malzeme yüzeyinde kirletici maddeler bulunması durumunda alkali çözeltiler ile yüzeyin temizlenmesi işlemidir [59-61].

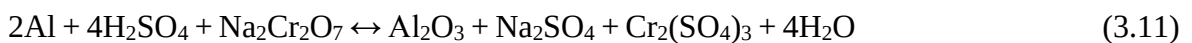
Alkali dağlama (Etching):

Yüzeyin alkali çözeltiler ile kimyasal olarak aşındırılarak temizlenmesi alkali dağlama ile sağlanmaktadır. Bu yöntemde yüksek kostik konsantrasyona, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak temizleme hızı ve elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişmektedir. Kalın doğal bir oksit film tabakasının olması veya çok fazla yağdan arındırma yapılması gerekiyor ise, genellikle kostik soda bazlı güçlü korozyon temizleyiciler kullanılmaktadır. Bunun sonucunda yüzey hızlı bir şekilde temizlenmekte ve mat bir görünüm elde edilebilmektedir. Ancak alüminyum ve alaşımları aşındırma solüsyonlarına maruz bırakıldıktan sonra alüminyum alaşımına da bağlı olarak yüzeyde “leke” olarak adlandırılan yüzeye yapışan reaktif olmayan reaksiyon ürünleri oluşmaktadır. Metaller arası bileşikler de dahil olmak üzere bu reaksiyon ürünlerinden bazıları, dağlama çözeltisinde çözünmeyerek alüminyum parçaların yüzeyinde kalmaktadır [61, 71].

Asitle temizleme (deoxidation):

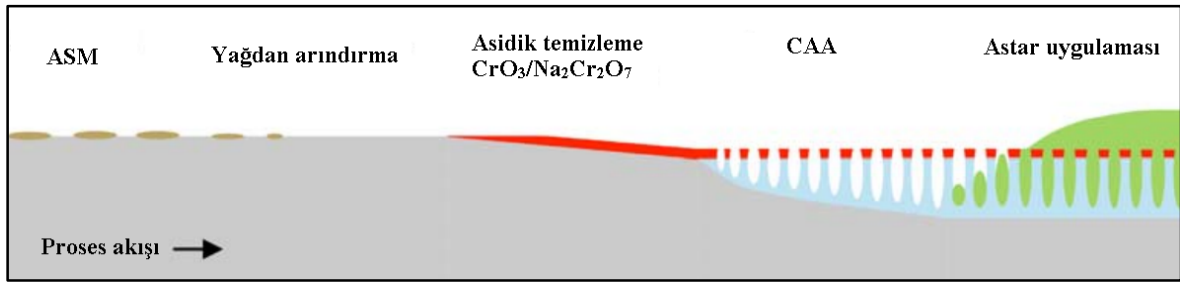
Alüminyumun kararlı koşullarda (4-8,5 pH) oksijenle teması sonucu doğal olarak oluşan ince alüminyum oksit tabakası yeterli koruma sağlayamaz. Dolayısıyla yüzeyde oluşan ince oksit tabakası, 4-8,5 pH aralığını aşan çözeltiler ile çıkarıldıktan sonra anotlanarak, kararlı bir oksit tabakasının oluşması istenmektedir. Bununla birlikte, yüzeyde alkali dağlama ile giderilemeyen reaksiyon ürünlerinin sebep olduğu lekelerin temizlenmesi için deoksidasyon işlemi son derece etkili ve verimli bir adım olarak görülmektedir. Deoksidasyon işleminin ardından geriye dengeyi korumak için elektron verip kararlı hale geçmek isteyen çıplak alüminyum yüzey kalmaktadır ve bu anodik oksidasyon öncesi [72].

Forest Products Laboratory (FPL) ve kromik-sülfürik asit (CSA) yaygın olarak kullanılan asidik çözeltiler arasında yer almaktadır. FPL’de sodyum dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ve sülfürik asit çözeltisi kullanılırken, bu işlemin Avrupa versiyonu olan CSA’de, sülfürik asit ile birlikte daha düşük konsantrasyonlarda krom trioksit (CrO_3) veya sodyum dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) kullanılmaktadır (Hennemann & Brockmann, 1981; 62). Her iki yöntem de iki aşamalı bir reaksiyon mekanizmasını takip etmektedir. Eş. 3.11, alüminyumun oksidasyonu karakterize edilirken, Eş. 3.12’de oluşan alüminyum oksit sülfürik asit ile çözünmektedir.





İkinci adım birinciden daha yavaş olduğundan, yüzeyde ince bir oksit katmanı oluşmaktadır. Bu oksit katmanı Şekil 3.16'daki kırmızı olarak gösterilmektedir. Ayrıca, yüzey enerjisi etkileşimleri nedeniyle üçlü tane sınır noktalarından uzanan whisker benzeri oksit çıkıntıları oluşabilmektedir [63].



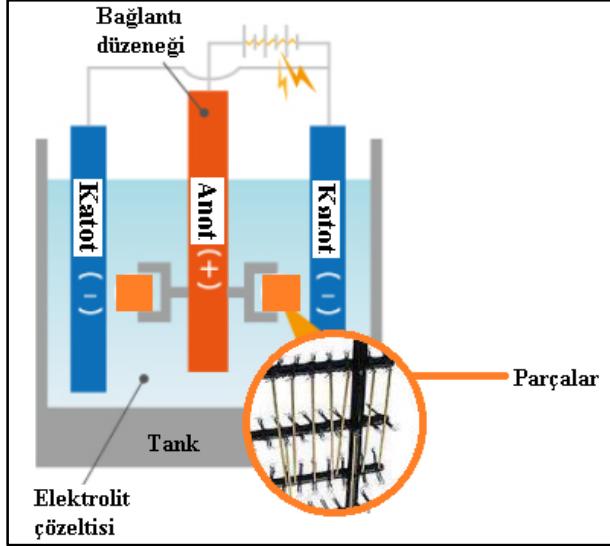
Şekil 3.13. Avrupa Havacılık ve Uzay Endüstrisinde uygulanmakta olan tüm Cr bazlı ön işlem ve anodizasyon adımlarının şematik gösterimi [63]

Nitrik-hidroflorik ($\text{HNO}_3 + \text{HF}$) asit karışımı ise bakır ve silikon içeren alüminyum alaşımları üzerindeki hidratlı oksit tabakasının kaldırılmasında kullanılmaktadır. HNO_3 , bakır çöktürmelerinin ve HF, oksitleyici asitlerde mümkün olan SiO_2 oluşumunu önlemektedir. Bu nedenle silikon içeren alüminyum alaşımlarında kullanılmaktadır [64].

Anodik oksidasyon (anodizing):

Alüminyum yüzeyinde kararlı bir oksit film tabakası oluşturmak için yapay olarak uygulanan elektrokimyasal bir işlemdir. Anodik oksidasyon, adını alüminyum alt yüzeyinin bir elektrolitik hücrede anot olarak kullanılmasından almaktadır. Şekil 3.14'te görüldüğü üzere anot DC güç kaynağının pozitif terminale bağlanırken, katot negatif terminale bağlanmaktadır. Devre tamamlandığında, elektronlar alüminyum anottan çekilerek alüminyum atomlarının metal/oksit arayüzündeki alüminyum katyonlarına (Al^{3+}) oksidasyonunu kolaylaştırmaktadır. Alüminyum oksidin iletkenliği düşük olduğundan, anodik hücre üzerine uygulanan eoksal voltajı, oluşan oksit film tarafından bir dirençle karşılaşmaktadır. Bu, metal/elektrolit arayüzünde potansiyel bir düşüşe yol açarak, oksit tabakası üzerinde yüksek bir elektrik alan oluşumuna neden olmaktadır. Bu elektrik alanları tipik olarak 10^6 ila 10^7 V/m'lik oksit tabakası boyunca iyonik göçle oksit büyümesini

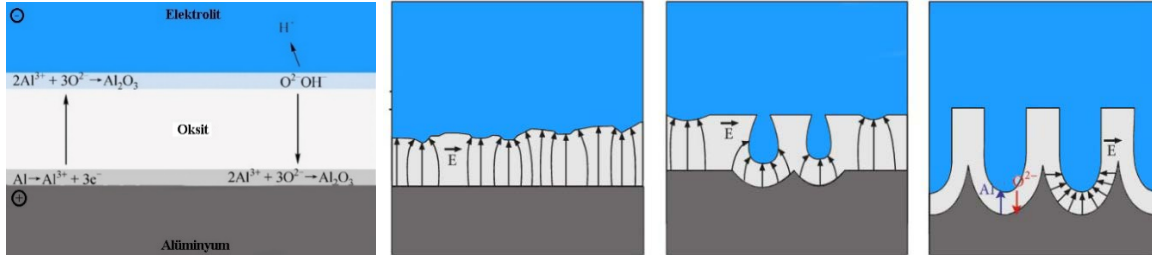
sağlayacak kadar yüksek değere sahiptir. Bu elektrik alan değeri oksit tabakası kalınlaştıkça azalacak ve iyon taşınımı engelleyerek oksit tabakasının büyümesini sonlandıracaktır [65].



Şekil 3.14. Anodik oksidasyon tankı bağlantı düzeneği

Eloksal kaplamada, anottaki absorbe edilmiş su, negatif yüklü O^{2-} ve OH^- iyonlara ayrılmaktadır. Bu anyonlar pozitif yüklü anodik metal alt yüzeyine doğru göç etmekte ve burada O^{2-} iyonları metal/oksit arayüzündeki Al^{3+} katyonları ile reaksiyona girerek alümina (Al_2O_3) oluşturmaktadır. Üretilen Al^{3+} katyonlarının tümü bu arayüz tarafından tüketilmediğinden, kalan Al^{3+} katyonları pozitif yüklü anottan uzaklaşmaktadır. Oksit/elektrolit arayüzüne ulaşan Al^{3+} katyonları, oksit/elektrolit arayüzünde mevcut O^{2-} ile reaksiyona girerek alüminyum oksit oluşturmaktadır. Nihai film morfolojisi, oksit büyümesi ile oksit çözünmesi arasındaki dengeye bağlıdır [65-66].

Şekil 3.15'te görüldüğü üzere, oksitler altta kompakt bir bariyer tabakası ve üstte nispeten düzenli altıgen gözenekli bir yapıdan oluşmaktadır. Bariyer tabakası, anodizasyonun erken safhasında oluşmakta ve üstte oluşan gözenekli bir tabakanın büyümesini desteklemektedir. Bu gözenekli yapı, bariyer tabakasının altındaki elektrolitik olarak çözülmüş alüminyum ve oksijenin reaksiyonu ile oluşmaktadır. Gözenekli yapıdaki büyüme anodik işlem boyunca devam ederken, bariyer tabakası da içe doğru büyüme eğilimi göstermektedir ve bariyer tabakası belli bir kalınlığı ulaştıktan sonra çok fazla büyüme göstermemektedir. Oluşan gözenekli yapı oksit tabakasının bir parçasıdır ve üstten bakıldığında merkezi olarak konumlandırılmış altıgen yapıdaki hücrelerin birleşiminden oluşmaktadır [67, 71].



Şekil 3.15. Alüminyum/elektrolit arayüzündeki oksit tabakası oluşum mekaniği [70]

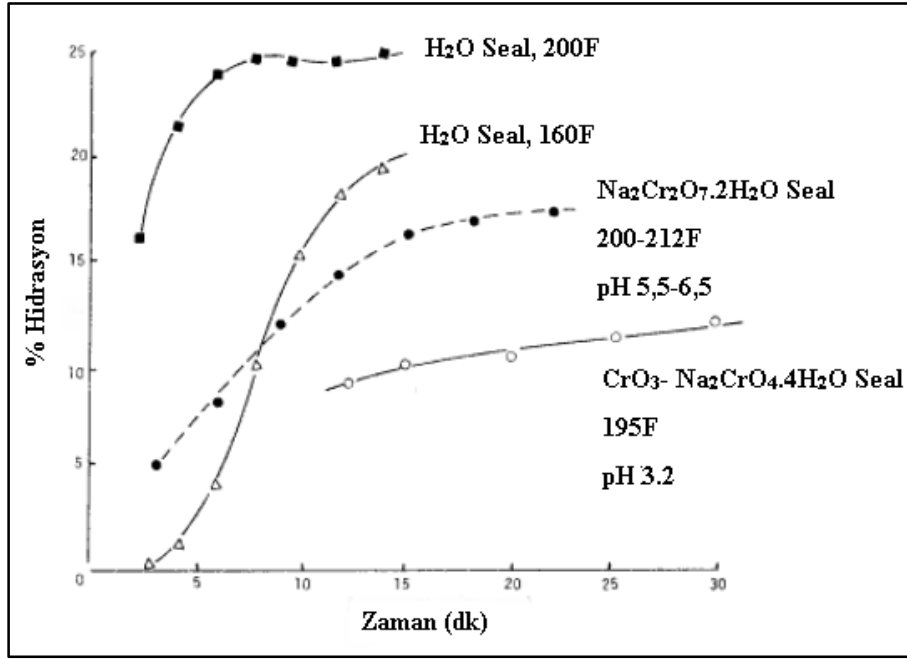
Tespit işlemi (Sealing):

Alüminyumun anodik oksidasyonu sonrası oldukça gözenekli bir anodik film elde edilmektedir. Bu gözeneklerin açık olması, ortamdaki aşındırıcı ve kirletici maddelerin gözeneklere nüfus etmesini kolaylaştıracak ve anodik filmin korozyon direncini azaltacaktır. Tespit diğer adıyla seal işleminin amacı, gözenekli anodik kaplamanın kimyasal olarak aktif yüzeyini kimyasal olarak aktif olmayan bir yapıya dönüştürüp, gözenekliği azaltmaktır. Bu, korozyona karşı seal uygulanmamış oksit tabakasından daha iyi koruma sağlamaktadır. Farklı çeşitleri bulunmaktadır.

Deiyonize su ile seal işleminde, kaynama noktası veya kaynama noktasına yakın sıcaklıklardaki deiyonize su kullanılmaktadır. Bu işlemde, Al_2O_3 ile su etkileşiminden oluşan böhmit (Eş. 3.13), anodik oksit kaplamanın gözenekli yapısını kapatarak hacimce bir artışa sebep olmaktadır.

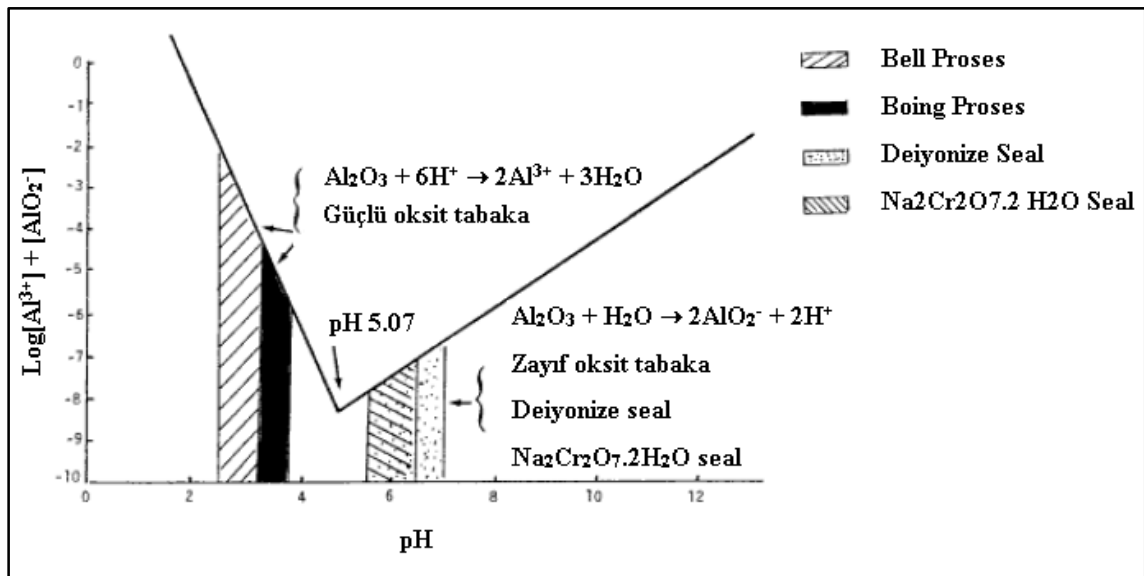


Dikromat seal işlemi ise, sıcak deiyonize suyla gözeneklerin doldurulması ve Cr^{6+} 'nın gözeneklerde birikmesiyle gerçekleşen iki işlemin bir kombinasyonudur. Hidrasyon oranı, deiyonize suyla seal işlemine göre çok daha yavaş olduğundan proses daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir. Korozyon direnci, sıcak su seal işlemine benzer şekilde emilen kromat iyonlarının gözenekleri doldurulmasıyla sağlanmaktadır. Şekil 3.16'da sıcaklığın hidrasyona etkisi gösterilmektedir [68-70].

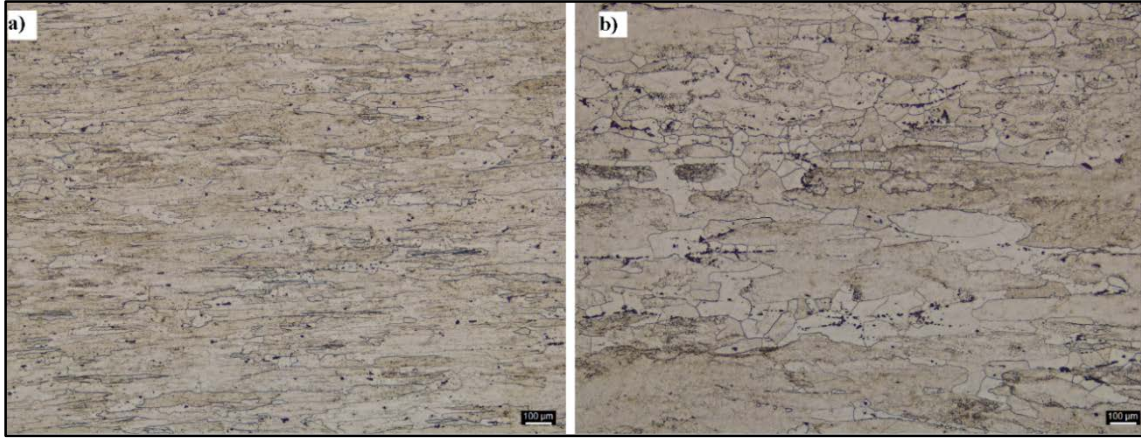


Şekil 3.16. Farklı seal işlemlerindeki zaman-hidrasyon grafiği [69]

Seal işlemi ayrıca sıcaklık, zaman, pH, su saflığı ve alüminyum alaşımın türüne bağlı olarak da farklılık gösterebilmektedir. pH değeri 3'ün altına düştüğünde oksit filmin çözünürlüğü büyük ölçüde artmakta ve çözülmeye başlamaktadır. Özellikle 5,5-7 pH aralığında deiyonize ile sodyum dikromat seal iyi bir korozyon direnci sağlamaktadır. Şekil 3.20'de pH değerinin seal işlemine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.17. pH'nın 25°C'deki Al_2O_3 ve hidratinin çözünürlüğü üzerindeki etkisi [69]



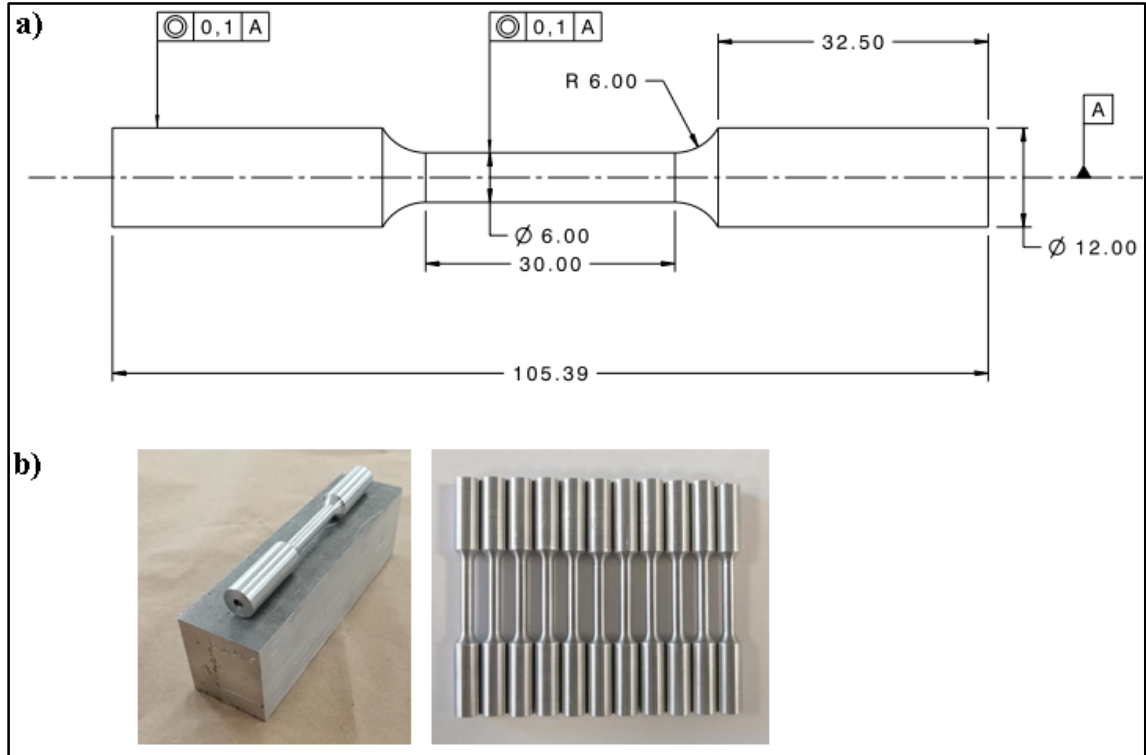
Resim 3.9. AA7050-T7451 optik mikroskop görüntüsü a) L-ST düzlemi b) L-LT düzlemi

Deneylerde kullanılacak test numuneleri ise ASTM-E8/8M standardına uygun olarak AA7050-T7451 38 mm kalınlığa sahip hadde yönü bilinen plakadan kesilerek işlenmiştir. Ham malzeme Resim 3.10’da gösterilmiştir.

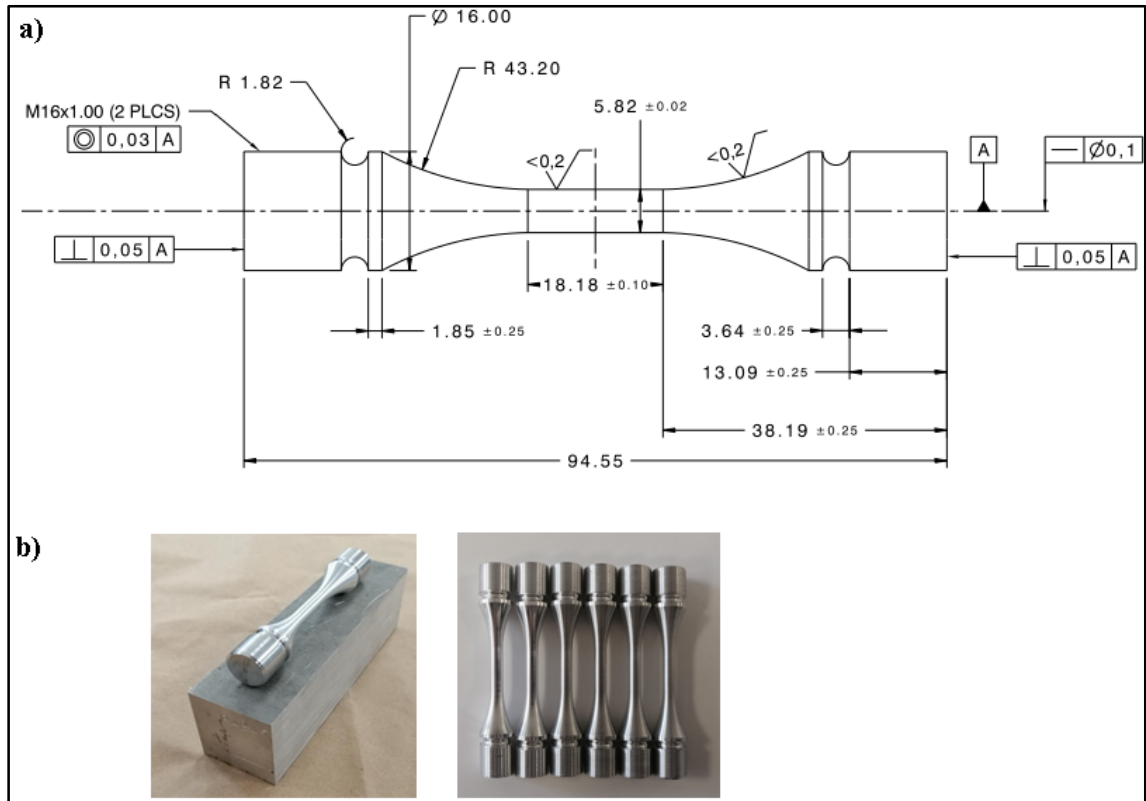


Resim 3.10. Hadde yönü bilinen AA7075-T7451 plaka

Çekme ve yorulma test numuneleri sırasıyla, hadde yönüne dik şekilde (90°) testerede kesildikten sonra Resim 3.11 a) ve Resim 3.12 a)’da verilen teknik resimdeki ölçü ve toleranslara uygun olarak işlenmiştir. Teknik resme uygun olarak işlenen numuneler Resim 3.11 b) ve Resim 3.12 b)’de ayrıca gösterilmiştir.



Resim 3.11. Çekme test numunesi a) Teknik resim b) ASM numune



Resim 3.12. Yorulma test numunesi a) Teknik resim b) ASM numune

ASTM-E8/8M ve ASTM-E466 standartına göre hazırlanan çekme ve yorulma testi numunelerinin bir kısmına CAA işlemi uygulanmıştır. Anodik oksidasyon uygulanmış (CAA) ve uygulanmamış (ASM) numunelerin sayısı Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. ASM ve CAA çekme ve yorulma test numune sayısı

Uygulanacak Test	Malzeme Türü	Yüzey İşlem	Malzeme Sayısı
Çekme testi	AA7050-T7451	ASM	5
	AA7050-T7451	CAA	5
Yorulma Testi	AA7050-T7451	ASM	8
	AA7050-T7451	CAA	10

3.4.2. AA2024-T3 alaşımının karakterizasyonu

Temel alaşım elementi olarak bakır içeren 2024 alüminyum alaşımı, ısıl işlem uygulanabilen 2xxx serisi alüminyum alaşım grubundandır. Bu alaşım, yüksek sıcaklıklarda mükemmel mukavemet sergilemesinin yanında yüksek sıcaklıklarda ki sürünme direncinden dolayı endüstriyel uygulamalarda kullanılan önemli bir alaşımdır. Bu alaşımın ayrıca farklı kondisyondaki tepeleri mevcuttur: T3 ve T4 tipi temperlerde olanlar yüksek toklukları ile bilinirken, T6 ve T8 temperleri yüksek mukavemete ve üstün korozyon dirence sahiptir.

Alüminyum alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik işlemler arasında çökeltme (yaşlanma) sertleştirilmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu işlem % 4 Cu içeren AA2024-T3 alaşımında Al_2Cu çökeltileri oluşturarak, mukavemeti artırmasına rağmen korozyon direncini düşürmektedir. Bu nedenle, AA2024-T3 sac malzemelerin üstü ve altı sıcak haddelenmeyle galvanik olarak daha anodik olan saf alüminyum ile kaplanarak korozyona karşı koruma sağlanmaktadır. Alcladding 2024-T3 alaşımı uçak gövdesi kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [15, 33, 36].

Tuz püskürtme ve cross-cut yapışma testi için deneysel çalışmalarda saf alüminyum kaplı AA2024-T3 (AMS 4462 standartına göre üretilmiş) alaşımı kullanılmıştır. AA2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.9’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. AA2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları

Elementler (% wt)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al2024-T3 t=1mm	0.07	0.12	4.7	0.58	1.3	0.01	0.12	0,02
Diğer elementler: % 0.05 – 0.15, Al: kalan								

Tuz püskürtme korozyon ve cruss-cut yapışma testleri için kullanılacak deney numuneleri 1 mm kalınlığında ve 250 mm x 75 mm ölçülerinde giyotin makasta hadde yönünde (0°) kesilmiştir. Resim 3.13'te uygulanacak testler için hazırlanan numune örneği ve Çizelge 3.10'da test numune sayısı verilmiştir.

Çizelge 3.10. Tuz püskürtme korozyon ve cruss-cut yapışma testi numune sayısı

Uygulanacak Test	Malzeme Boyutu (mm)	Malzeme Sayısı
Tuz püskürtme korozyon testi	250x75x1	5
Cross-cut yapışma testi	250x75x1	5

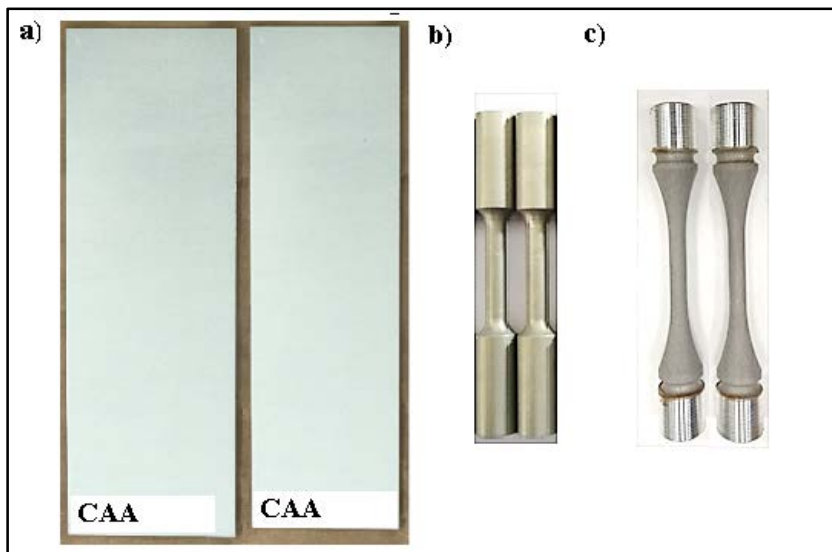


Resim 3.13. Tuz püskürtme ve cross-cut yapışma test numunesi

3.5. Anodik Oksidasyon İşlemi

Anodik oksidasyon öncesi deney numunelerini yağ, organik kir ve mevcut lekelerinden arındırmak için yağdan arındırma (vapor degreasing), alkali temizleme (alkaline clean), alkali dağlama (alkaline etching) ve asidik temizleme (acid pickling) işlemleri sırasıyla uygulanmıştır. Bu ön hazırlık işlemleri, kaplamanın alt tabaka yüzeyine homojen bir şekilde etki etmesini sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Bu sayede, oksit film tabakasındaki olumsuz etkiler ortadan kaldırılarak korozyona karşı yeterli koruma elde edilmektedir.

Alkali dağlama işleminde, doğal olarak oluşan oksit film tabakasını temizlemek için kostik soda bazlı aşındırıcı temizleyiciler kullanılmaktadır. Ancak aşındırıcı solüsyona maruz bırakılan yüzeylerde reaktif olmayan reaksiyon lekeleri oluşmaktadır. Metaller arası bileşikler de dahil olmak üzere bu reaksiyon ürünlerinden bazıları, dağlama çözeltisinde çözünmeyerek alüminyum parçaların yüzeyinde kalmakta ve anodik oksidasyon sonrası oksit tabakasının altında düzensizliklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, anodik oksidasyon öncesi son bir yüzey temizliği için asidik temizleme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerin ardından 5 dakikalık zaman dilimi içinde 4V'luk bir artışla 22 ± 1 V'luk bir gerilime ulaşılmıştır ve bu sabit gerilim altında anodik oksidasyon işlemi yaklaşık 45 dakika boyunca sürdürülmüştür. Anodik oksidasyon sonrası numune görüntüleri Resim 3.14'te verilmiştir.

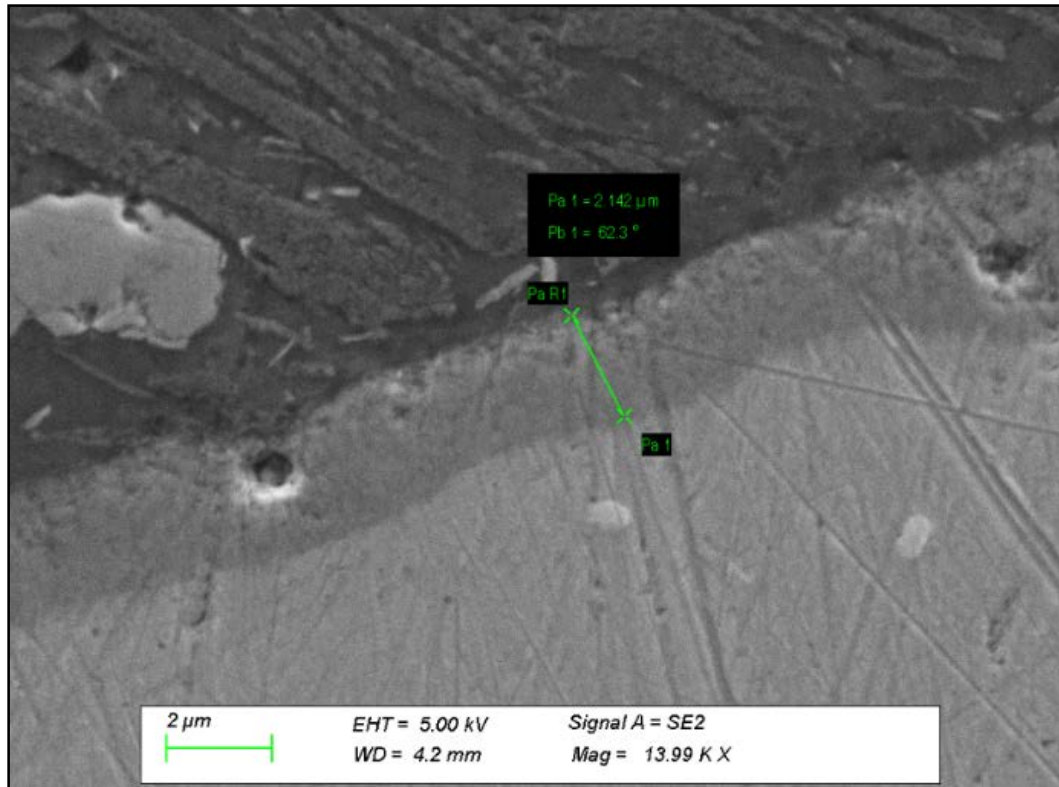


Resim 3.14. Anodik oksidasyon sonrası test numuneleri a) AA2024-T3 korozyon ve cross-cut yapışma testi b) AA7050-T7451 çekme testi c) AA7050-T7451 yorulma testi

Çizelge 3.11’de CAA yüzey işlem parametreleri ve kimyasal bileşenleri verilmiştir. Anodik oksidasyon sonrası SEM’de incelenen numunelerde, oksit filmin kalınlığı 2-5 μm arasında değişkenlik göstermektedir. Resim 3.15’te oksit film kalınlığı gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Anodik oksidasyon prosesindeki işlem parametreleri

İşlemler	Kimyasal bileşen	Konsantrasyon	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)
Yağdan arındırma	Trikloretilen	%100	83-86	2
Alkali temizleme	Turco 4215 NC-LT	40-60 g/lt	50-60	8
Alkali dağlama	NaOH Na ₂ S TEA	120-195 g/lt 11,2-26,2 g/lt 30-60 g/lt	25-30	7
Asidik temizleme	Turco Liquid Smut-Go NC Nitrik asit	200-250 g/lt 50-80 g/lt	20-40	7
Anodik Oksidasyon	Kromik asit	50-100 g/lt	35	50



Resim 3.15. SEM’de ölçülen oksit film tabakasının kalınlığı

3.6. Sertlik ve Pürüzlülük Ölçümü

Anodik oksidasyon sonrası her bir numune için yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve iletkenlik değerleri sırasıyla MarSurf XR20, Verimet M4900C ve Mitutoyo HR-500 cihazları yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm aşamasında her numunenin üç farklı bölgesinden değerler alınarak ortalama değerler ya da ölçüm aralığı elde edilmiştir. ASM ve CAA test numunelerinin yüzey pürüzlülüğü yapılacak deneylerden hemen önce ölçülerek anodik oksidasyon uygulanmış ve uygulanmamış yüzey koşulları arasında fark karşılaştırılmıştır. Elde edilen ortalama pürüzlülük değerleri birbirlerine çok yakın olduğu için pürüzlülük değerlerinin testler üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ve sertlik ölçümleri AA2024-T3 ve AA7050-T7451 numuneleri için sırasıyla Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.12. AA2024-T3 alaşımı için yüzey pürüzlülük, sertlik ve iletkenlik değerleri

Anodizasyon Türü	Sertlik (HRB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	İletkenlik (% I.A.C.S.)
ASM	64,3	0,1993	33,5-33,8
CAA	67,0	0,2225	33,4-33,7

Çizelge 3.13. AA7050-T7451 alaşımı için yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri

Anodizasyon Türü	Sertlik Değeri (HR15T)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
ASM	87,4	0,1910
CAA	88,1	0,2419

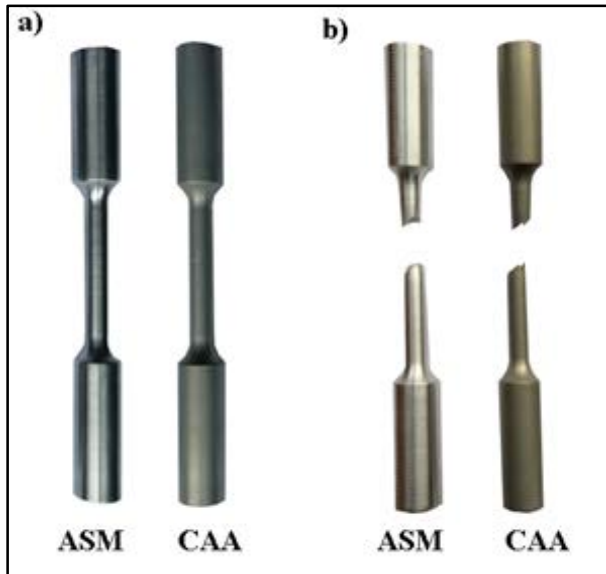
3.7. Çekme Testi

Anodik oksidasyon işleminin AA7050-T7451 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Bu test, ASTM-E8/8M standartına uygun olarak Resim 3.16'da gösterilen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.16. Çekme testi deney düzeneği

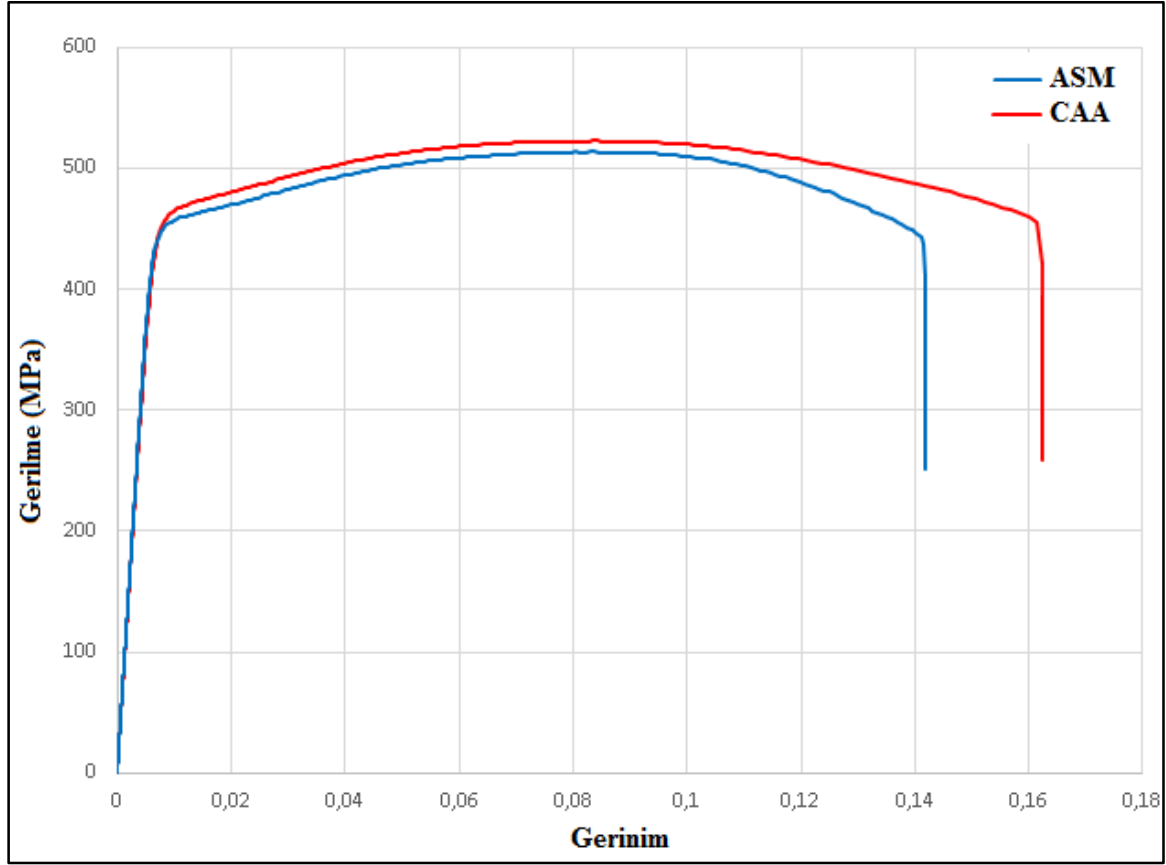
ASM ve CAA numunelerin test öncesi ve test sonrası görüntüleri Resim 3.17’de gösterilmiştir.



Resim 3.17. Çekme testi sonrası numune görüntüleri a) Test öncesi b) Test sonrası

Elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 3.18’de ve anodik oksidasyonun AA7050-T7451 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi Çizelge 3.14’te verilmiştir. Çekme testleri

sonucunda, CAA numuneler ASM numunelere kıyasla nispeten yüksek bir akma ve çekme gerilmesi kazanmıştır.



Şekil 3.18. ASM ve CAA uygulanmış AA7050-T7451 test numunelerinin çekme test grafiği

Çizelge 3.14. Anodik oksidasyonun AA7050-T7451 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi

Al7050-T7451	Akma Gerilmesi (MPa)	Mak. Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastik Modül (GPa)
ASM	448,4	511,4	74,9
CAA	456,9	523,6	73,2

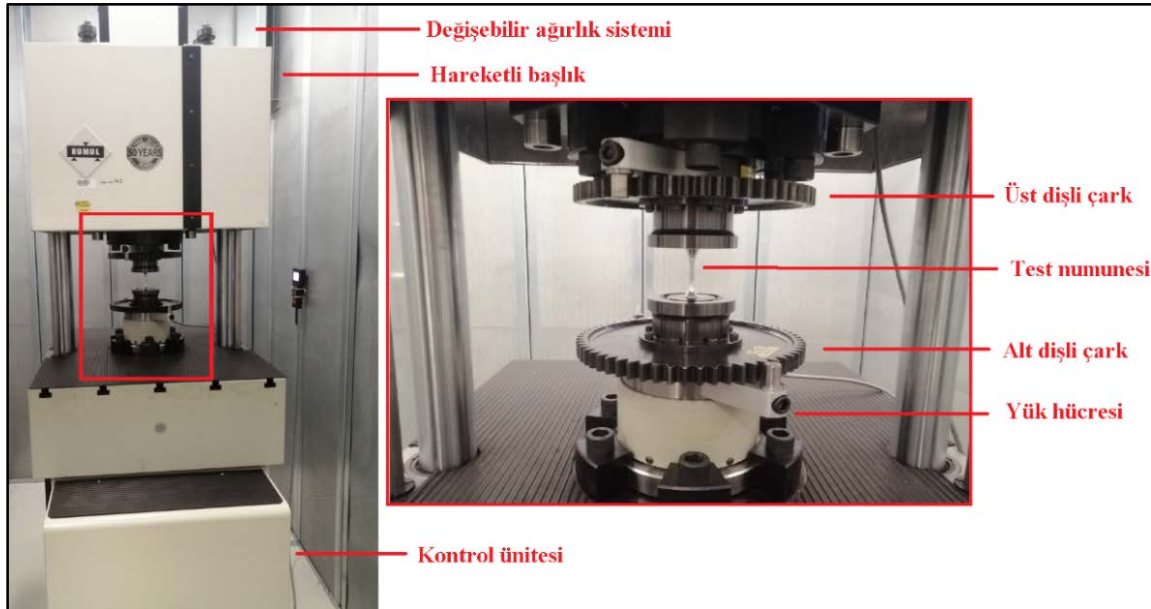
3.8. Anodik Oksidasyonun Malzemenin Yorulma Performansı Üzerindeki Etkisi

Anodik oksidasyonun yorulma davranışına etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen yorulma testleri belirli bir prosedüre bağlı olarak oluşturulmaktadır. ASTM E466 ve ASTM E647 gibi uluslararası standartlar, test tipine göre yorulma testi

prosedürlerini açıklamaktadır. Metalik malzemeler için kuvvet kontrollü sabit genlikli yorulma testleri ASTM E466'ye göre uygulanmaktadır. ASTM E466 göre yorulma test makinesinin tipi belirtilmediğinden, bu araştırmada yorulma testleri için rezonans test makinesi kullanılmıştır.

Rezonans test cihazları, malzemenin doğal rezonansında salınımla çalışmaktadır. Dinamik yüklemeye önce dişli kutusu ve servomotor tarafından kontrol edilen bilyalı mil yardımıyla numune, yorulma testinin ortalama yüküne statik olarak yüklenmektedir. Dinamik yükleme, numunenin kütlesi ve elastikiyeti ile tahrik edilen salınımlı sistem tarafından uygulanır. Elektromıknatıslar test makinesinin üst tarafında bulunur ve salınımlı sistem elektromanyetik etkileşim ile etkinleştirilir. Salınımlı sistem, sistemin kütlesi değiştirilerek kısmen kontrol edilebilmektedir. Test sıklığı, test makinelerinin üst kısmındaki kütleler etkinleştirilerek azaltılabilir veya artırılabilir.

ASM ve CAA test numunelerinin tek eksenli yorulma testleri, ASTM E466 standartına uygun olarak $R = -1$ gerilme genliği ve 90 Hz'lik sabit frekansta eksenel rezonans test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin bölümleri Resim 3.18'de gösterilmiştir.



Resim 3.18. Rezonans test cihazı deney düzeneği

Eksenel rezonans test cihazında gerçekleştirilen testlerde, her bir numune için uygulanan gerilme değerleri ve test sonrası elde edilen çevrim sayıları Çizelge 3.15'te verilmiştir.

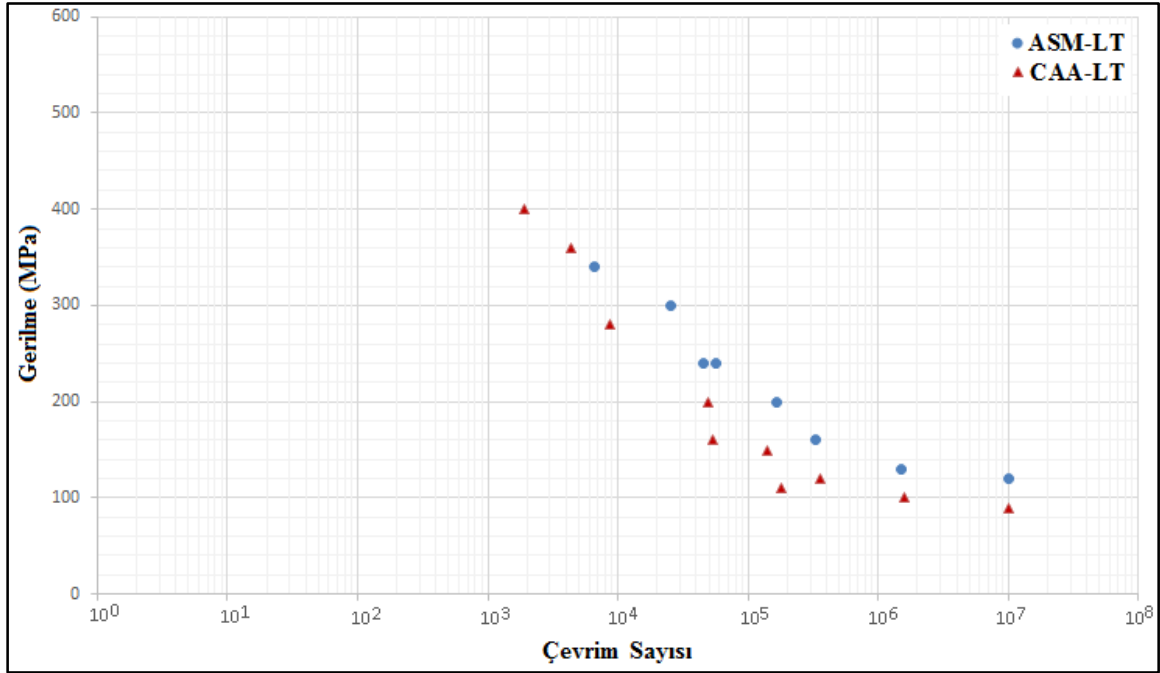
Yorulma testleri, numuneler üzerinde Resim 3.19’de görüldüğü gibi üzere çatlak oluşana kadar (ya da tamamen kırılana kadar) veya belirli bir çevrim sayısına ulaşana kadar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin grafiksel gösterimi ayrıca Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Resim 3.19. Yorulma test numunesi a) Deney öncesi b) Deney sonrası

Çizelge 3.15. Yorulma test numunelerine uygulanan gerilmeler ve çevrim sayıları

Yorulma Testi Numune Grupları					
ASM			CAA		
Numune	Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı	Numune	Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı
ASM-1	340	6 672	CAA-1	400	1 924
ASM-2	300	25 726	CAA-2	360	4 398
ASM-3	240	55 832	CAA-3	280	8 774
ASM-4	240	45 315	CAA-4	200	48 516
ASM-5	200	214 534	CAA-5	160	53 688
ASM-6	160	332 018	CAA-6	150	140 764
ASM-7	130	1 500 000	CAA-7	120	357 526
ASM-8	120	10 000 000	CAA-8	110	179 308
			CAA-9	100	1 600 000
			CAA-10	90	10 000 000



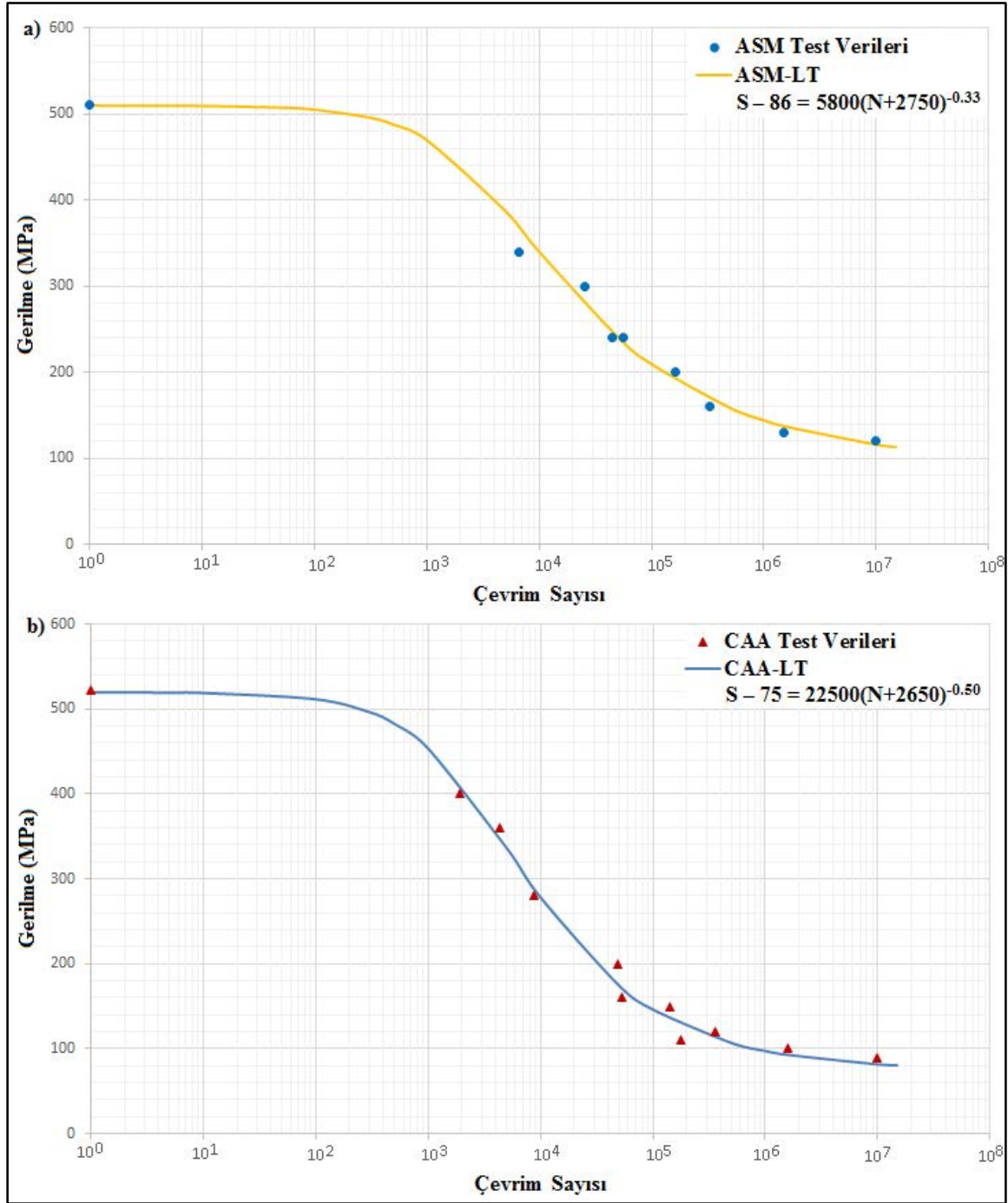
Şekil 3.19. AA7050-T7451 ASM ve CAA yorulma test numuneleri için yorulma test verileri

Yorulma testlerinde elde edilen gerilme-çevrim oranı ilişkisini S-N yorulma grafiğine dönüştürmek için birçok istatistiksel yaklaşım uygulanmaktadır. Bunlar arasında literatürde sıklıkla kullanılan ve eşitlik 1’de verilen Weibull eşitliğidir. Bu eşitlikte; S uygulanan gerilme, S_e sonsuz ömürdeki gerilme değeri, N belirli bir gerilme değerindeki çevrim sayısı ve a , b , B denklem değişkenleridir. Yüksek çevrimli testlerde, yorulma grafiğinin elde edilebilmesi için en az yedi numunenin verilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

$$S - S_e = b(N+B)^{-a} \quad (3.14)$$

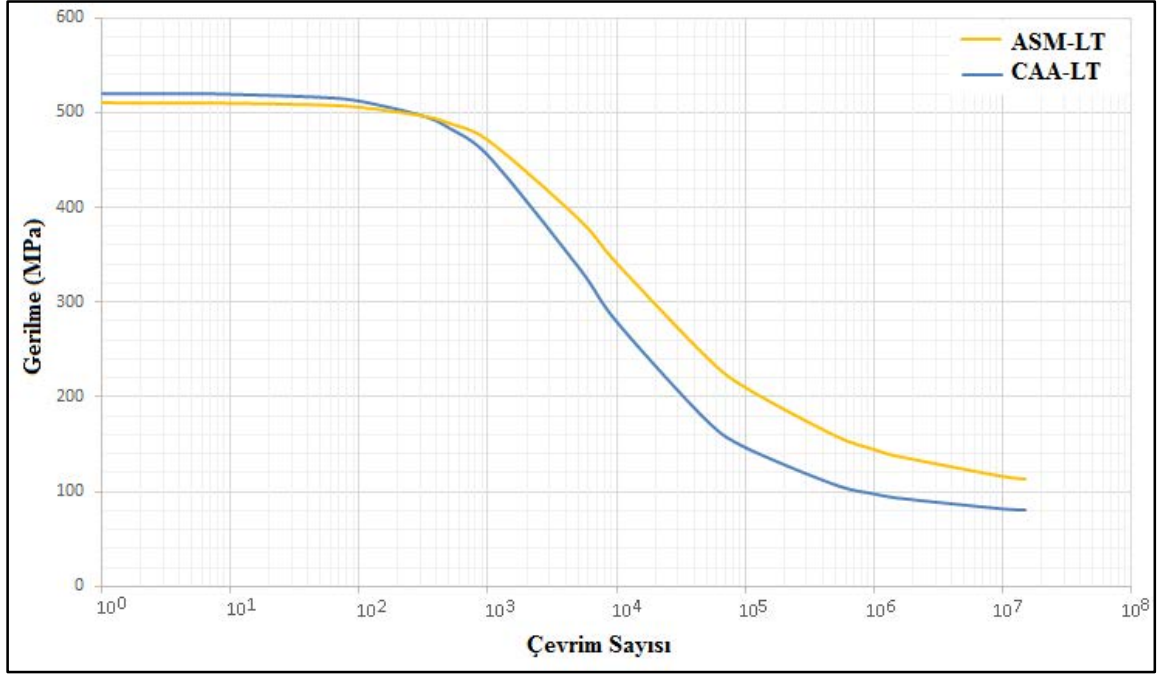
S-N grafiğini oluşturmak için Weibull denklemindeki bilinmeyen parametreler (S_e , b , B , a), doğrusal olmayan regresyon modeli için en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu yaklaşımın avantajı, test verilerinin tamamını istatistiksel olarak ele alması ve en düşük veri dağılımına sahip bir ortalama eğri oluşturmaktır. Diğer taraftan, $N=1$ ve çok düşük çevrimlerde S-N grafiği sonsuz olarak elde edilmediği sürece maksimum gerilme değeri S-N yorulma grafiğinin oluşturulmasında pratik bir yöntem olarak kullanılmaktadır [50-51].

ASM ve CAA deney numunelerinin Weibull eşitliği ile oluşturulan S-N yorulma grafikleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



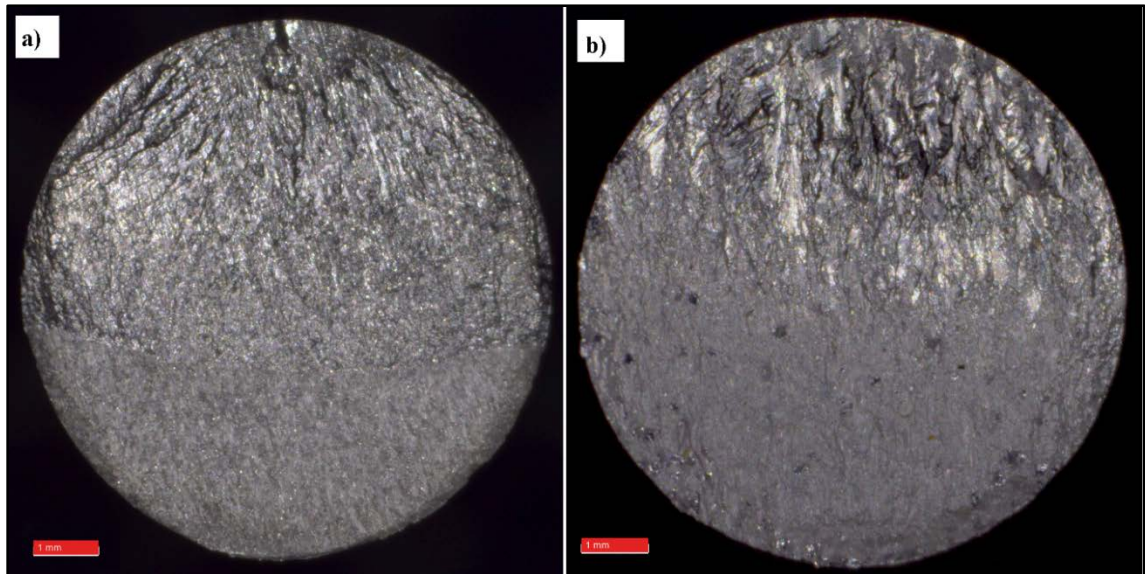
Şekil 3.20. S-N yorulma grafikleri a) ASM b) CAA

Yorulma grafikleri karşılaştırıldığında; yüksek çevrimli gerilmeler altında CAA numuneler ASM numunelere göre daha düşük yorulma dayanımı göstermektedir. Düşük çevrimlerde ise anodik oksidasyonun yorulma dayanıma etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Şekil 3.21’de verilen yorulma grafiklerinde bu değişim net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.21. ASM ve CAA test numuneleri S-N yorulma grafikleri

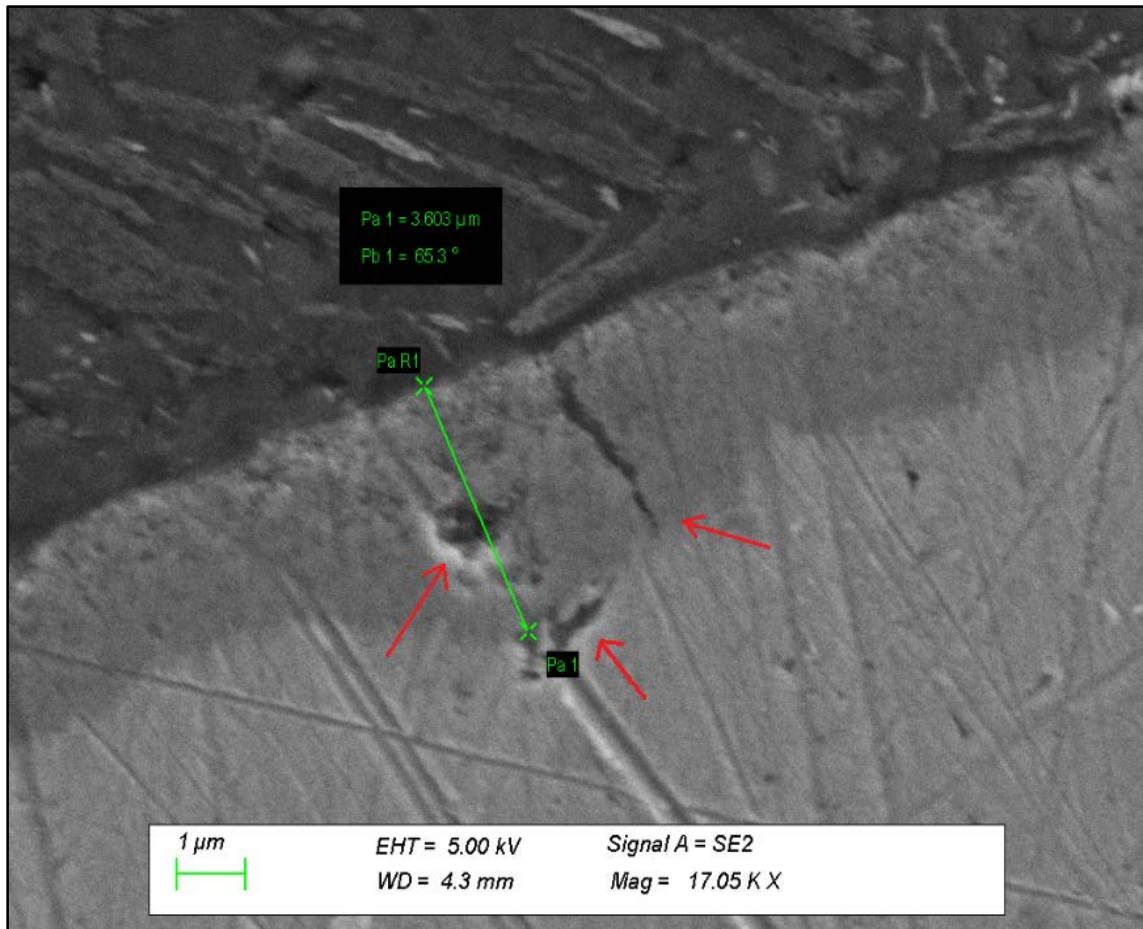
Deney numuneleri incelendiğinde, yorulma hasarı her iki numunede önce çatlak ilerlemesi ve ardından yük taşıyan kesit kritik bir değerin altına düştüğünde ani kırılma olarak meydana gelmektedir. Ancak kırılma ve sert oksit tabakasındaki çatlak başlangıcının kolay bir şekilde meydana gelmesi ve düşük gerilmelerde oksit tabasında görülen çatlak başlangıç sayısının fazla olmasından kaynaklı olarak yorulma dayanımında düşüş görülmektedir. Resim 3.20’de dijital mikroskopta incelenen deney numuneleri gösterilmiştir.



Resim 3.20. Dijital mikroskop görüntüleri a) ASM, 130 MPa b) CAA, 120 MPa

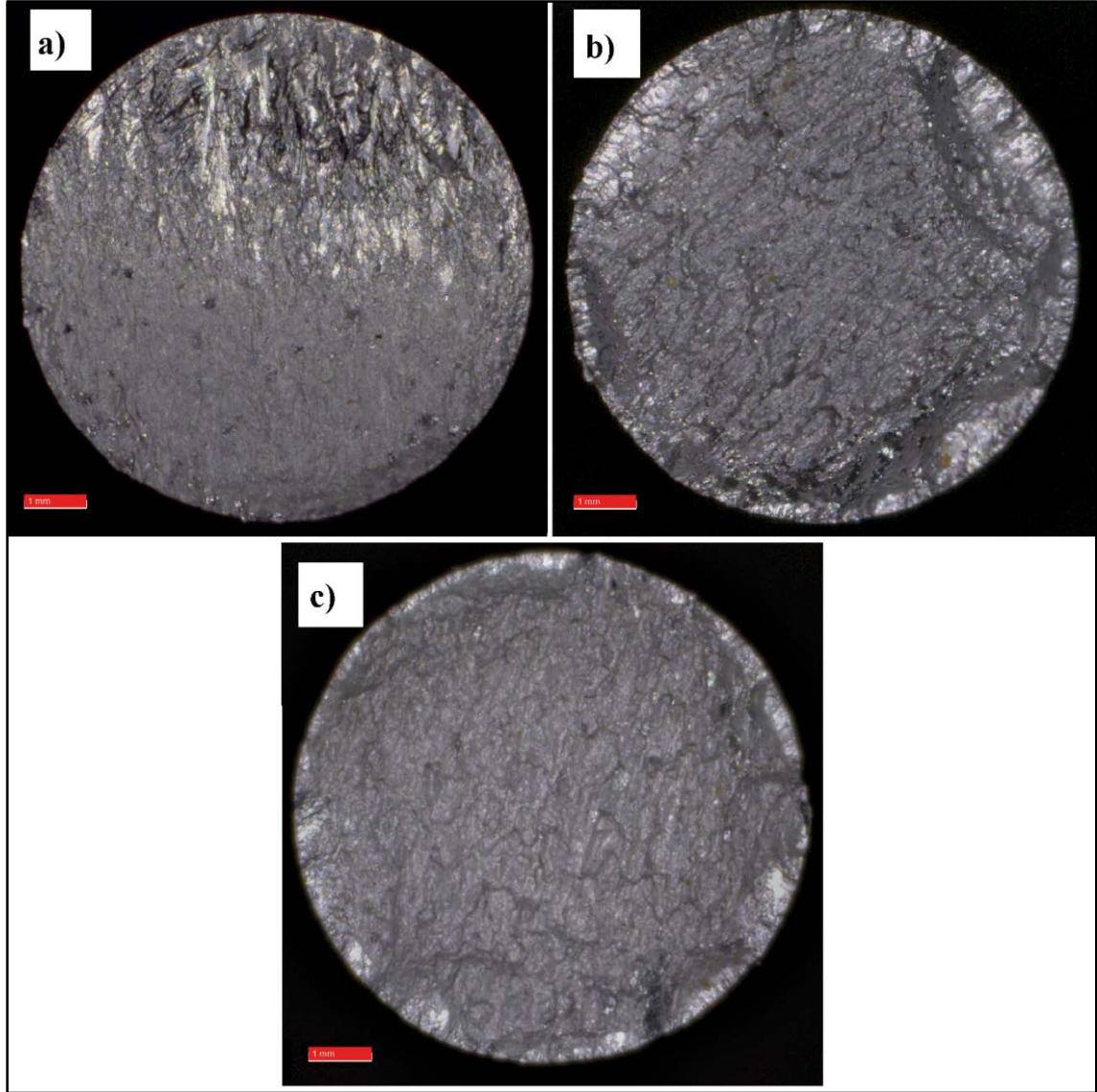
Bununla birlikte, metal/oksit ara yüzeyindeki parçacık kaynaklı oluşabilecek düzensizlikler, anodik oksidasyon işleminin ilk evrelerinde çözünbilmekte ve metal-oksit ara yüzeyi boyunca çukurlaşma benzeri kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Bu kusurlar yapılan literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere çentik etkisi oluşturup çatlak başlangıcını kolaylaştırmaktadır [2-10, 16-18].

Resim 3.21’de oksit tabakasında görülen kusurlar gösterilmiştir. Bu kusurlar, metal/oksit arayüzünde ve oksit takasında bulunan düzensizlikler olarak görülmüştür.



Resim 3.21. Oksit film tabakasında görülen çatlak ve çukurlaşma kusurları

Yüksek gerilmelerde ise Resim 3.22’de görüldüğü üzere birden fazla bölgede çatlak başlangıcı görülmekte ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak çatlak yayılımı hızlanmaktadır. Bu durum ASM ve CAA deney numunelerinin yorulma grafiğinde benzer bir eğilim göstermesine neden olmaktadır.



Resim 3.22. CAA yorulma test numunesi dijital mikroskop görüntü a) 120 MPa b) 360 MPa c) 400 MPa

3.9. Anodik Oksidasyonun Korozyon Direnci Üzerindeki Etkisi

AA2024-T3 alaşımı kullanılarak hazırlanan test numunelerinin korozyon testleri, ASTM B117'ye göre ağırlıkça % 5 sodyum klorür (NaCl) içeren çözelti kullanılarak 35 ± 2 °C'de gerçekleştirilmiştir. Tuz püskürtme testi için numuneler dikeyde 15° lik açılarda eğimli hale getirildikten sonra Resim 3.23'de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir.



Resim 3.23. Deney düzeneği a) Numune sabitleyici aparat b) Tuz püskürtme test kabini

Deney numunelerine yağdan arındırma, alkali temizleme, alkali dağlama ve asidik temizleme ön işlemleri uygulandıktan sonra CAA işlemi uygulanmıştır. Ardından tespit (Sealing) işleminin korozyon direncine etkisini incelemek için bazı numuneler deiyonizesu ile seal uygulanmıştır. Seal uygulanmış numuneler ASTM B117'ye göre en az 336 saat tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur.

Test süresi boyunca numuneler düzenli aralıklarla kontrol edilmiştir. Korozyona uğrayan numuneler deney düzeneğinden çıkarılarak test süresi kaydedilmiştir. Çizelge 3.16'te tuz püskürtme testi sonrası numunelerin korozyona uğrama süreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.16. Tuz püskürtme testi sonuçları

Malzeme	Boyut (mm)	Numune Sayısı	Yüzey işlem	Test Süresi (sa)
AA2024-T3	250x75x1	3	CAA + Seal	336
AA2024-T3	250x75x1	3	CAA	200
AA2024-T3	250x75x1	3	ASM	24

Yapılan bu deneyde, ASM numunelerde 24 saat içinde korozyon başlangıcı görülmüştür. Diğer taraftan seal uygulanmış CAA numuneler diğer numunelere kıyasla çok daha iyi bir korozyon direnci göstermiştir. Deney sonrası test numune görüntüleri Resim 3.24'te gösterilmiştir. Numuneler incelendiğinde, sadece CAA uygulanmış numunenin yüzeyinde belirgin bir şekilde çukurlaşma korozyon başlangıçlarının olduğu görülmektedir. Seal uygulanmış CAA numunede ise çukurlaşma korozyon başlangıçlarının tek düze olduğu görülmektedir.



Resim 3.24. Tuz püskürtme testi sonrası deney numuneleri a) ASM b) CAA c) CAA + Seal

3.10. Cross-Cut Boya Yapışma Testi

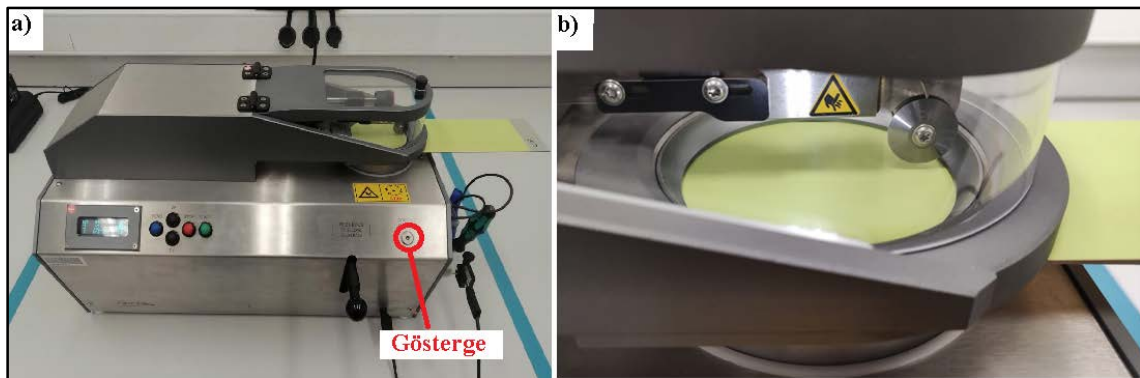
Bu test yöntemi, organik kaplama dik açıda bir kafes deseni ile taban malzemeyi delip geçecek şekilde kesildiği zaman, boya kaplamasının alt tabakadan (oksit tabakası) ayrılmasına karşı direncinin değerlendirilmesini açıklayan ISO 2409 standartına göre uyarlanmıştır.

Deneylerde, organik kaplamanın oksit tabakaya yapışma direncini değerlendirmek için Al2024-T3 alaşımı CAA ve ardından astar boya ile kaplanmış numuneler kullanılmıştır. Kaplama sonrası numunelerin ayırt edilebilmesi için 20x75 mm'lik yüzeye markalama yapılmıştır, ardından bu yüzey maskelendikten sonra stronsiyum kromat epoksi astar ile kaplanmıştır. Kaplama kalınlığı yapılan ölçümlerde 25-30 μm arasında değişkenlik göstermektedir. Resim 3.25'te stronsiyum kromat epoksi astar kaplı test numunesi gösterilmiştir.



Resim 3.25. Stronsiyum kromat epoksi astar kaplı test numunesi örneği

Daha sonra Tam Otomatik Cross Cut ve Çizilme Test Cihazı (Resim 3.26 a)) kullanılarak kaplamada dik açılı bir kafes modeli oluşturulmuştur. Bu model, altı paralel kesim ve ardından bir kafes oluşturmak için altı dikey kesim yapılarak kaplama üzerinde oluşturulmuştur.



Resim 3.26. Deney düzeneği a) NeoTec Tam Otomatik Cross Cut ve Çizilme Test Cihazı b) Cross Cut ve Çizilme Test Cihazı kesici ucu

ISO2409'a göre her bir kesim arasındaki mesafe kaplama kalınlığına ve malzeme sertliğine bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 3.15'te kaplama kalınlığı ve aralık mesafesi verilmiştir. Kafes deseni, Resim 3.26 b)'da gösterilen kesici takım yardımıyla 14 N'luk bir kuvvet uygulanarak 1mm'lik aralıklar ile gerçekleştirilmiştir. Kesim derinliği uygulanan kuvvete bağlı olarak değişmektedir. Görsel muayene sonrası kesim işleminin oksit tabakaya ulaşmadığı görülürse, uygulanan kuvvet arttırılarak kesim işlemi tekrarlanır. Bu işlem ayrıca cihaz üzerindeki temas göstergesi yardımıyla da kontrol edilebilmektedir.

Çizelge 3.17. ISO2409'a göre kaplama kalınlığı ve malzeme sertliğine göre kesim parametreleri

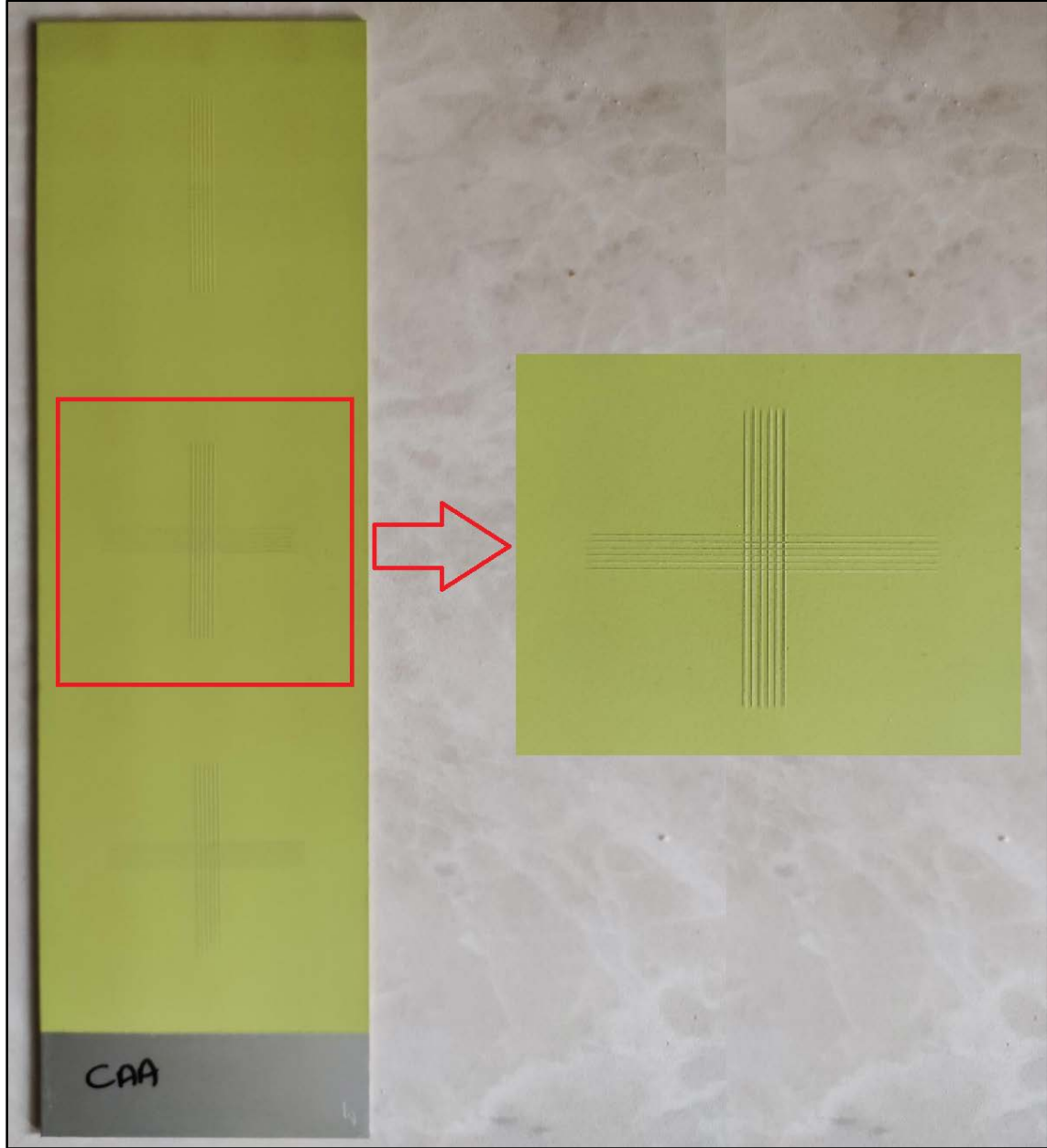
Kaplama kalınlığı	Kesim aralığı
$\leq 60 \mu\text{m}$	1 mm, sert malzemeler
$\leq 60 \mu\text{m}$	2 mm, yumuşak malzemeler
61-120 μm	2 mm, sert ve yumuşak malzemeler
121-250 μm	3 mm, sert ve yumuşak malzemeler

Kesim işlemi sonrası kafes deseni etrafındaki gevşek film tabakaları yumuşak bir fırça ile hafifçe fırçalanarak çıkarılmıştır. Ardından 3M bandı kafes deseni üzerine iyi bir temas sağlamak için bir rulo yardımıyla düzleştirildikten sonra bir parça serbest (yapışmamış) şerit çıkıntı bırakılmıştır (Resim 3.27). Birkaç dakika sonra (<5 dakika), 3M bandının serbest ucu sıkıca tutularak, yaklaşık 60 ° 'lik bir açıyla astar filminden elle sabit bir şekilde çekilmiştir.



Resim 3.27. Rulo yardımıyla kafes desenine tam teması sağlanan 3M bant

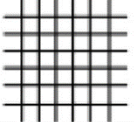
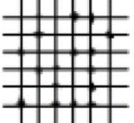
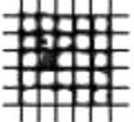
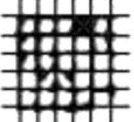
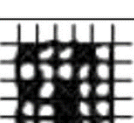
Astar film üzerinde oluşturulan kafes desenin, fırçalama ve 3M bant uygulaması sonrası görsel muayene yapılmıştır. Yapılan incelemede, kafes desenini oluşturan paralel kesikler arasında herhangi bir boya kalkması görülmemiştir. Bu işlem, her bir numune üzerinde üç kez tekrarlanmıştır. Resim 3.28’de kafes desenleri oluşturulan numune örneği gösterilmiştir.



Resim 3.28. Cross-cut yapışma test numunesi üzerinde oluşturulan kafes deseni

Deney sonrası kesim yapılan tüm yüzeyler Şekil 3.22’de verilen tabloya göre değerlendirilmiştir. Bu tabloda, sıfır puan en iyi boya yapışmasını temsil etmektedir ve yapılan deneylerde herhangi bir şekilde boya kalkması olmadığından, CAA sonrası astar

uygulanan numune yüzeyindeki boya yapışmasının son derece iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Puan	Kafes deseni görünümü
0	
1	
2	
3	
4	
5	

Şekil 3.22. ISO2409'a göre boya yapışma değerlendirme tablosu

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kromik asit anodizasyonun (CAA) AA7050-T7451 alaşımının mekanik özellikleri ve AA2024-T3 alaşımının korozyon ile oksit tabakası boya yapışma direnci üzerindeki etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Anotlanmış numunelerin sertlik ve yüzey pürüzlülüğünde kaplama kalınlığına da bağlı olacak şekilde bir artış gözlenmiştir.
2. Anodizasyon sonrası oluşan oksit tabakasının gevrek yapısından dolayı AA7050-T7451 numunelerin maksimum çekme ve akma dayanımları üzerinde yaklaşık %2'lik bir artışa neden olmuştur.
3. S-N yorulma grafikleri karşılaştırıldığında, 10^3 - 10^7 çevrimleri arasındaki gerilmelerde yüzey işlem nedeniyle CAA kaplı numunelerin yorulma dayanımda azalma gözlenmiştir. Bu durum, sert ve pürüzlü bir yapıya sahip olan oksit tabakasının, yorulma kırılması için gereken çatlak başlangıçlarını kolaylaştırmasından kaynaklanabilmektedir.
4. Yüksek gerilmelerdeki düşük çevrimlerde, anodik oksit kaplamanın etkisi göz ardı edilebilir düzeydedir. Bu durum, oksit film yapısında görülen kusurların yüksek gerilmelerde ki etkisinin az olmasıyla açıklanabilmektedir.
5. CAA işleminin malzemenin korozyon direncini arttırdığı ve deiyonize seal uygulanmış CAA numunelerin korozyon direncinin diğer numunelere kıyasla daha iyi olduğu gözlenmiştir.
6. Yapılan cross-cut boya yapışma testlerinde oksit tabakasına astar boyasının iyi bir şekilde uygulanabildiği görülmüştür.

Elde edilen çalışma sonuçları, anodik oksit kaplamanın malzemenin mekanik özelliklerini etkilediği için tasarım kriteri olarak dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılacak çalışmalar kapsamında anodizasyon proses parametreleri değiştirilerek (uygulanan voltaj, sıcaklık, anodik oksidasyon süresi ve elektrolit çözeltisi konsantrasyonu) farklı kalınlık ve yapıda oksit tabakaları ile testler tekrarlanabilir. Bu sayede oluşturulacak bir doküman ile çalışma şartlarına bağlı olarak hangi oksit tabakasının oluşturulması gerektiği kolaylıkla bulunabilir.

KAYNAKLAR

1. Koch, G. H., Varney, J., Payer, J. H., Thompson, N. G., and Moghissi, O. (2016). IMPACT: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. *NACE International Report: QAPUS310GKCOH (AP110272)*, Houston, Texas, 1-11.
2. Ding, Z., Smith, B. A., Hebert, R. R., Zhang, W., and Jaworowski, M. R. (2018). Morphology perspective on chromic acid anodizing replacement by thin film sulfuric acid anodizing. *Surface and Coating Technology*, 350, 1-31
3. Setianto, M. H., and Korda, A. A. (2019). Characterization of tartaric-sulphuric acid anodized 2024-T3 aluminium alloys with anodizing potential variation. *Journal of Physics: Conference Series* 1204 012039, 1024, 1-9.
4. Zhang, J. S., Zhao, X. H., Zuo, Y., and Xiong, J.P. (2008, April 15). The bonding strength and corrosion resistance of aluminum alloy by anodizing treatment in a phosphoric acid modified boric acid/sulfuric acid bath. *Surface and Coatings Technology*, 202(14), 3149-3156.
5. Thompson, G. E., Zhang, L., Smith, C. J., and Skeldon, P. (1999). Boric/sulfuric acid anodizing of aluminum alloys 2024 and 7075: Film growth and corrosion resistance. *Corrosion*, 55(11), 1052-1061.
6. Lee, E., Jeong, Y., and Kim, S. (2012, June). S-N fatigue behavior of anodized 7050-T7451 produced in different electrolytes. *Metallurgical and Materials Transactions*, 43A, 2002-2010.
7. Shih, T. S., Lee, T. H., and Jhou, Y. J. (2014). The effects of anodization treatment on the microstructure and fatigue behavior of 7075-T73 aluminum alloy. *Materials Transactions*, 55(8), 1280-1285.
8. Cirik, E., and Genel, K. (2008). Effect of anodic oxidation on fatigue performance of 7075-T6 alloy. *Surface and Coating Technology*, 202, 5190-5201.
9. Monsalve, A., Paez, M., Toledano, M., Artigas, A., Sepulveda, Y., and Valencia, N. (2007). S-N-P curves in 7075 T7351 and 2024 T3 aluminium alloys subjected to surface treatments. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30(8), 748-758.
10. Demirel, M. Y. (2018). *Alüminyum Sac Malzemelerde Sıcaklığın ve Hadde Yönünün Geri Esnemeye Etkisinin Deneysel Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-14.
11. Demirel M. Y., ve Karaağaç İ. (2020). 7075- T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine tavlama işleminin etkisinin deneysel olarak araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 23(2): 283-289.

12. Groover, M. P. (2019). *Modern imalatın prensipleri (4. baskı)*. (Çev. Prof. Dr. Mustafa Yurdakul ve Doç. Dr. Yusuf Tansel İç). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık. (Eserin orijinali 2006'de yayımlandı), 98-683.
13. Gregson, P. J. (2013). Aluminium alloys; physical metallurgy, processing and properties. In H. M. Flower (Ed.), *High performance materials in aerospace*. London: Springer International Publishing, 49–84.
14. Campbell, F. C. (2006). *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Amsterdam: Elsevier Publishing, 15-92.
15. Starke, E. A., and Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172.
16. De Aquino, T. F., Riella, H. G., and Bernardin, A. M. (2011). Mineralogical and physical–chemical characterization of a bauxite ore from Igaratins, Santa Catarina, Brazil, for refractory production. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 32(3), 137–149.
17. Oğuz, B. (1990). *Demir dışı metaller kaynağı: Metalurji-uygulama*. İstanbul: Oerlikon Yayını, 1-864.
18. ASM International. (1991). *ASM handbook vol. 4: Heat treating*. USA: ASM International, 1861-1960.
19. ASM International. (2004). *ASM handbook vol. 9: Metallography and microstructures*. USA: ASM International, 1688-1787.
20. Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. USA: ASM International, 9-22
21. Vasudevan, A. K., and Doherty, R. D. (1989). *Aluminum alloys: Contemporary research and applications*. New York: Academic Press, Inc., 17-702.
22. Kaufman, J. G. and Rooy, E. L. (2004). *Aluminum alloy castings; properties, processes and applications*. USA: ASM International, 7-22.
23. Linder, J. (2012). *Alcoholate Corrosion of Aluminium in Ethanol Blends: The Effects of Water Content, Surface Treatments, Temperature, Time and Pressure*, Master Thesis in Corrosion Science, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 5-22.
24. Bardal, E. (2004). *Corrosion and protection: Engineering materials and processes*. London: Springer, 65-184.
25. Totten, G.E., and MacKenzie, D.S. (2003) *Handbook of aluminum: Alloy production and materials manufacturing*, New York: Marcel Dekker, 421-463.
26. Federal Aviation Administration. (2018). *Corrosion control for aircraft*. FAA Handbooks Series (Chapter 2), 1-17.
27. Holroyd, N. J. H. (2001). Aluminum alloys. In R. H. Jones (Ed.), *Environmental effects on engineered materials*, New York: Marcel Dekker, Inc., 173-251.

28. Ghali, E. (2010). *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys; understanding, performance, and testing*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 124-214.
29. Civil Aviation Authority. (2017). *Corrosion and inspection of general aviation aircraft*. West Sussex: Aviation House, 13-22
30. Davis, J. R. (1999). *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*. USA: ASM International, 23-134.
31. Savaşkan, Prof. Dr. Temel, (2009). *Malzeme bilgisi ve muayenesi (genişletilmiş ve geliştirilmiş 5. Baskı)*, Trabzon: Celepler Matbaacılık, 271-286.
32. Kelly, R. G. (2003). Crevice Corrosion. In Stephen D. Cramer and Bernard S. Covino, Jr. (Eds.), *Corrosion: Fundamentals, testing, and protection*. USA: ASM International, 242–247.
33. Huisert, M. (2001). *Electrochemical characterisation of filiform corrosion on aluminium rolled products*. Netherlands: DUP Science, 1-33.
34. Hahin, C. and Buchheit, R.G. (2003). *Filiform corrosion*. In Stephen D. Cramer and Bernard S. Covino, Jr. (Eds.), *Corrosion: Fundamentals, testing, and protection*. USA: ASM International, 248–256.
35. Revie, R. W., and Uhlig H. H. (2008). *Corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering (4th edition)*. New York: Wiley Publication, 1-476.
36. Lobry, V., Vandeputte, S., and Vereecken, J. (1998, September). *Influence of the Oxygen Concentration on Filiform Corrosion of Coated Aluminium Alloys*, European Corrosion Congress Eurocorr 2000, Utrecht, Netherlands
37. LeBozec N., Persson D., Thierry D., and Axelsen S.B. (2004). Effect of climatic parameters on filiform corrosion of coated aluminum alloys. *Corrosion*, 60(6), 584-592.
38. Jenkins, A.T.A., and Armstrong, R.D. (1996). The breakdown in the barrier properties of organic coatings due to filiform corrosion. *Corrosion Science*, 38 (7), 1147-1157.
39. Slabaugh, W. H., and Grotheer, M. (1954). Filiform corrosion of aluminium. *Industrial And Engineering Chemistry*, 46(5), 1014-1016.
40. Park, Y. W., Narayanan, T. S. N. S., Lee, K. Y. (2008). Fretting corrosion of tin-plated contacts. *Tribology International*, 41(7), 616–628.
41. Elleuch, K., Fouvry, S., and Kapsa, Ph. (2003). Fretting maps for anodised aluminium alloys. *Thin Solid Films*, 426(1–2), 271–280.
42. Czaban, M., (2018). Aircraft corrosion; review of corrosion processes and its effects in selected cases. *Fatigue Of Aircraft Structures*, 10, 5–20.
43. Lai, J., and Stadler, K. (2016). Investigation on the mechanisms of white etching crack (WEC) formation in rolling contact fatigue and identification of a root cause for bearing premature failure. *Wear*, 364-365, 244–256.

44. McEvily Jr, A. J. (1990). *Atlas of stress-corrosion and corrosion fatigue curves*. Materials Park, Ohio-44073: ASM International, 268-343.
45. Burleigh, T. D., Gillespie, E. H., and Biondich, S. C. (1993). Blow out of aluminum alloy 5182 can ends caused by transgranular stress corrosion cracking. In J. G. Morris, H. D. Merchant, E. J. Westerman, and P. L. Morris (Eds.), *Aluminum alloys for packaging*. The Minerals, Metals, and Materials Society, 323-332.
46. Rao, A. C. U., Vasu, V., Govindaraju, M., and Srinadh, K. V. S. (2016). Stress corrosion cracking behaviour of 7xxx aluminum alloys: A literature review. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 26(6), 1447-1471
47. Khalifeh, A. (2020). *Stress Corrosion Cracking Behavior of Materials: Engineering Failure Analysis*, London: Intechopen, 1-198
48. Jones, R. H. (1992). *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation*, Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 233-251.
49. Raja, V. S. and Shoji, T. (2011). *Stress Corrosion Cracking: Theory and Practice*, UK: Woodhead Publishing, 307-341.
50. AGARD, (1983). *Helicopter Fatigue Design Guide*. France: North Atlantic Treaty Organization, 109-132.
51. Weibull W. (1961). *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Sweden: Pergamon Press, 174-183.
52. Javaherdashti R. (2017). *Microbiologically influenced corrosion an engineering insight*, Switzerland: Springer International Publishing, 29-212.
53. Javaherdashti R., and Alasv K. (2019). *Biological Treatment of Microbial Corrosion: Opportunities and Challenges*, Netherlands: Elsevier, 25-70.
54. Hagenauer, A., Hilpert R., and Hack T. (1994). Microbiological investigations of corrosion damages in aircraft. *Material and Corrosion*, 45(6), 355-360.
55. Vargel, C. (2020). *Corrosion of aluminium*, Netherlands: Elsevier, 289-294.
56. Makhoulf, A. S. M., and Botello, M. A., (2018). Failure Analysis With Case Studies from the Construction Industries. In *Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Construction Industries*, (ed.) A. S. Hamdy Makhoulf and M. Aliofkhazraei, UK: Butterworth-Heinemann, 1-18.
57. Iverson, W. P. (1987). Microbial corrosion of metals. In A. I. Laskin (Ed.), *Advances in applied microbiology (volume 32)*. New York: Academic Press, Inc, 1-35.
58. Heitz, E., Flemming, H. C. and Sand, W. (1996). *Microbially influenced corrosion of materials (1st edition)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 35-64.
59. Critchlow, G. W., and Brewis, D. M. (1996). Review of surface pretreatments for aluminium alloys. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16(4), 255-275.

60. Montero-Moreno, J. M., Sarret, M., and Müller, C. (2007). Influence of the aluminum surface on the final results of a two-step anodizing. *Surface and Coatings Technology*, 201, 6352-6357.
61. Kwakernaak, A., Hofstede, J., Poulis, J., and Benedictus, R. (2010). Improvements in bonding metals (steel, aluminium). In D. A. Dillard (Ed.), *Advances in structural adhesive bonding*. London: Woodhead Publishing, 185–236.
62. Hennemann, O.D., and Brockmann, W. (1981). Surface morphology and its influence on adhesion. *The Journal of Adhesion*, 12(4), 297–315.
63. Abrahami, S. T., de Kok, J. M. M., Terryn, H., & Mol, J. M. C. (2017). Towards Cr(VI)-free anodization of aluminum alloys for aerospace adhesive bonding applications: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 11(3), 465-482.
64. Hauffe, K. (2010). Nitric Acid. In M. Schütze, D. Wieser and R. Bender (Eds.), *Corrosion resistance of aluminium and aluminium alloys*. Hessen: Wiley, 299-316.
65. Su, Z., and Zhou, W. (2008). Porous anodic metal oxides. *Science Foundation in China*, 16 (1), 36–53.
66. Garcia-Vergara, S. J., Skeldon, P., Thompson, G. E., and Habazaki, H. (2006). A flow model of porous anodic film growth on aluminium. *Electrochimica Acta*, 52(2), 681–687.
67. O’Sullivan, J. P., and Wood, G. C. (1970). The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical. *Physical and Engineering Sciences*, 317(1531), 511–543.
68. Ofoegbu, S. U., Fernandes, F. A. O., and Pereira, A. B. (2020). The sealing step in aluminum anodizing: A focus on sustainable strategies for enhancing both energy efficiency and corrosion resistance. *Coatings*, 10(3), 226.
69. Moji, Y. (1982). Improved chromic acid anodize seal for optimum paint adhesion. SAE Transactions, Seattle, WA: *SAE International*, 91, 2197-2205.
70. Kubica, M., Skoneczny, W., and Bara, M. (2018). Analysis of Al₂O₃ nanostructure using scanning microscopy. *Scanning*, 2018, 1–7.
71. Strazzi, D. E., Bellei, S., Duncan, D., and Oakite, C. (2002, June 24-27). Alkaline Etching of Aluminum and Its Alloy: A New Caustic Soda Recovery System. Annual International Technical Conference, Chicago, IL: *American Electroplaters and Surface Finishers Society*, 2-22.
72. Chandler, W. (2008). Pros and cons of alkaline vs. acid etching of aluminum. *Metal Finishing*, 106(9), 15–18.



GAZİ GELECEKTİR..